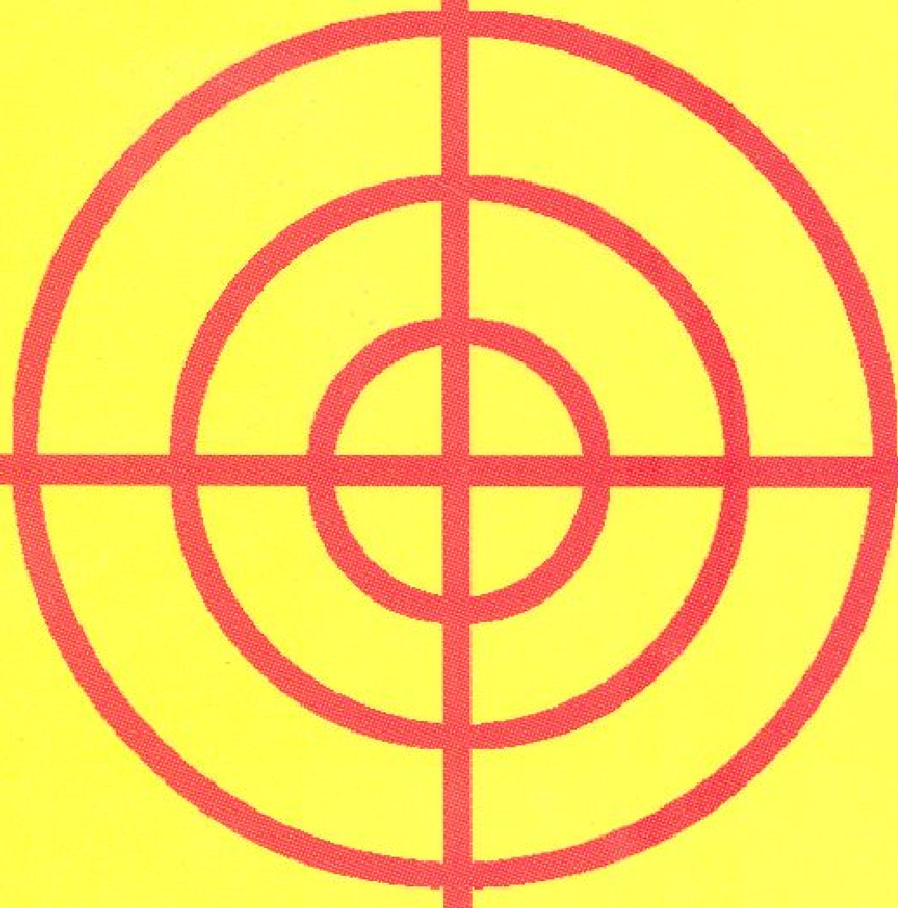
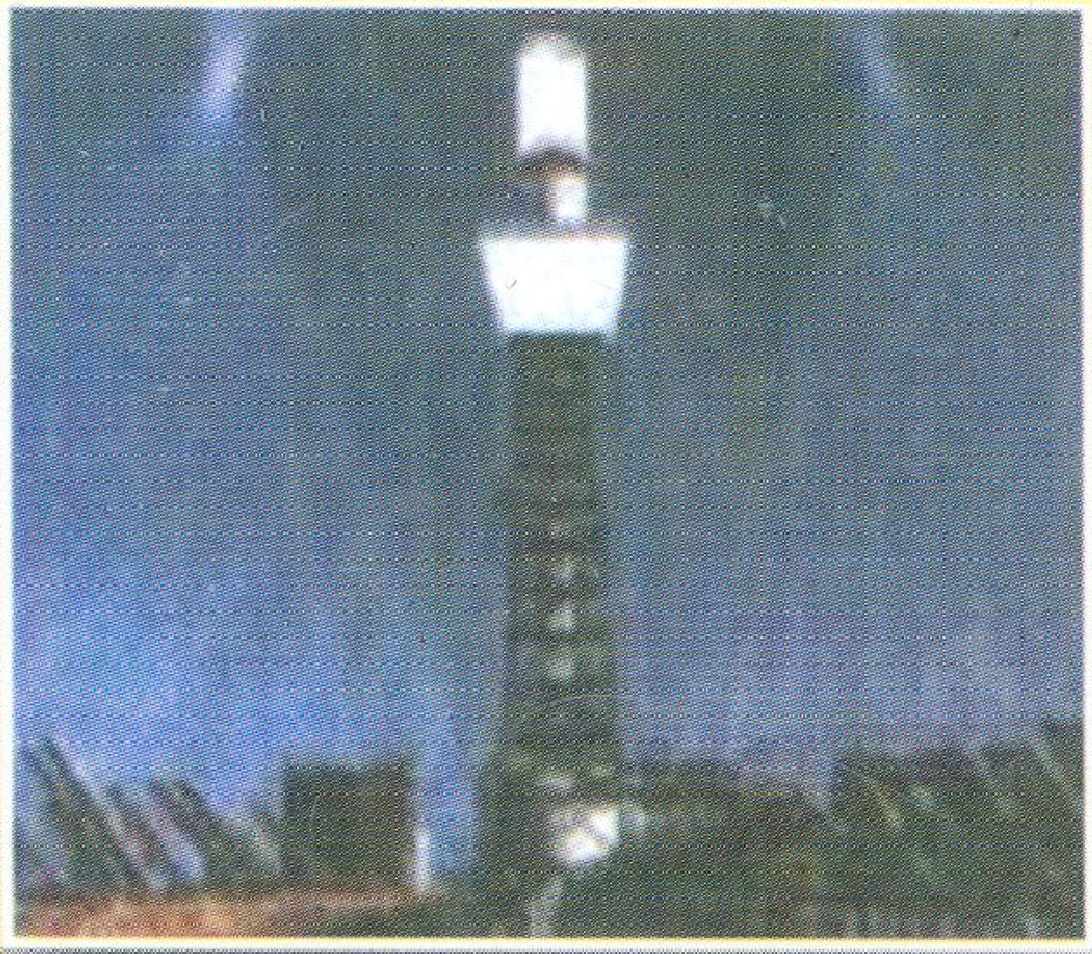
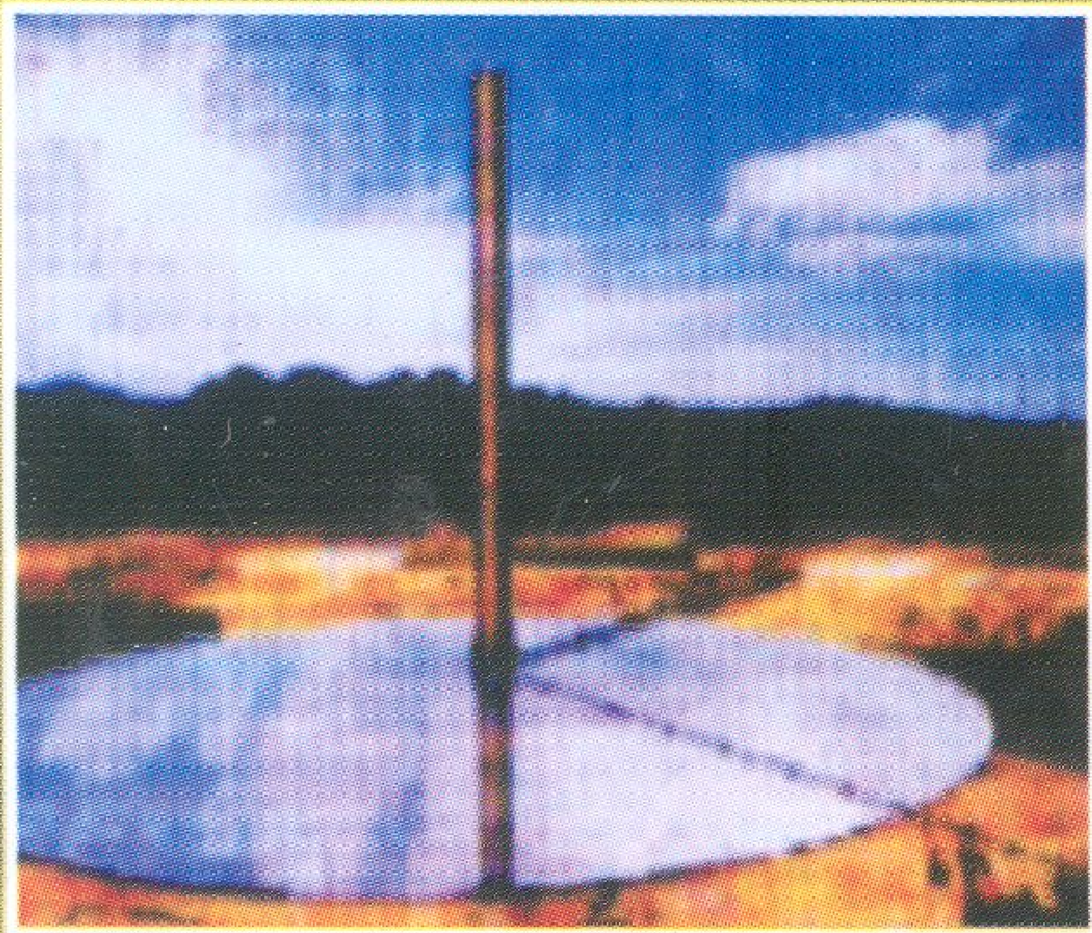


د. ياسر فتحي نصار









هندسة الطاقة الشمسية

التطبيقات الحرارية الفعالة



جامعة سبها

هندسة الطاقة الشمسية

التطبيقات الحرارية الفعالة

د. ياسر فتحي نصَّـار



منشورات جامعة سبها

□ **هندسة الطاقة الشمسية (التطبيقات الحرارية الفعالة)**

د. ياسر فتحي نصار

الطبعة الأولى : 2006

رقم الإيداع : 2006/7395 / دار الكتب الوطنية - بنغازي

الترقيم الدولي: ردمك 9 - 32 - 831 - 9959 ISBN

جامعة سبها

هاتف 629830 71 00218 - ص. ب. 10118 سبها

المحتويات

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الموضوع	الصفحة

الفصل الرابع: مجمعات التركيز

الفصل الخامس: تخزين الطاقة الشمسية

الفصل السادس: عمليات تحلية المياه بالطاقة الشمسية

الموضوع	الصفحة

الفصل السابع: التبريد، التكييف والتهوية

الفصل الثامن: الاعتبارات الاقتصادية والبيئية للطاقة الشمسية

الفصل التاسع: توليد الطاقة الكهربائية

الموضوع	الصفحة

الصفحة	الموضوع
	الفصل الحادي عشر: منظومات تجميع وخزن الطاقة الشمسية

المقدمــة

نتيجة لأحداث العقدين الأخيرين من القرن الماضي، ازداد القلق حول المشاكل المتعلقة بمصادر الطاقة التقليدية، وخطر نضوبها، وأيضاً المشاكل البيئية المصاحبة لاستخدام هذه الطاقات، وما نتج عنه من الظواهر الطبيعية الخطيرة ومنها ظاهرة الاحتباس الحراري وانتشار التلوث في البر والبحر والجو جراء الاستخدام المفرط للطاقات بما في ذلك بعض مصادر الطاقات المتجددة. ولذا وجب تقنيين الاستخدام وذلك بوضع برامج علمية لصناعة واستهلاك الطاقة على المستوى العالمي.

في قديم الزمان، كانت الحروب تنشب بسبب النزاع على مصادر الماء والكلأ. أما في العصر الحديث وبعد تطور الحياة وظهور الثورة الصناعية منذ قرنيين تقريباً، أصبح للطاقة دور أهم من الماء والكلأ، بحيث يمكن إنتاج الماء من الطاقة (محطات تحلية المياه). ولهذا تحول الصراع إلى مواطن توفر الطاقة والتي في معظمها تمثل طاقة الغاز والنفط والفحم. وباستمرار الطلب على هذه الطاقة وتزايد وتيرة النمو الاقتصادي في الدول الصناعية وتطور المدنية الحديثة المبنية أساساً على تكنولوجيا صناعة الطاقة، فإن الدول الصناعية المتقدمة بدأت تظهر أطماعها في السيطرة على أماكن الاحتياطيات الكبيرة من النفط والغاز والوقود النووي، وخاصة مع وجود الفراغ التقني الهائل في معظم الدول التي لديها احتياطي استراتيجي من هذه الطاقات، مقارنة بالطلب الهائل لهذه الطاقة في الدول الصناعية.

ولتدارك هذا الأمر وإنقاذ الأرض من كارثة بيئية أو حتى تقنية، فإنه كان لزاماً على العلماء البحث عن مصادر بديلة للوقود الأحفوري. هذه البدائل يجب أن تتميز بانتشارها على مدى واسع جغرافياً وعدم نضوبها، ومن بين هذه البدائل هو

الطاقات المتجددة. وبنظرة عامة على مصادر الطاقات المتجددة، تعتبر الطاقة الشمسية من الطاقات الواعدة والمرشحة لتتصدر قائمة الطاقة المتجددة المتاحة على المستوى التجاري، وذلك لتوافرها على مساحة كبيرة من سطح الكرة الأرضية. ناهيك عن أن الطاقة الشمسية هي أساس وجود كافة الطاقات الأخرى التقليدية منها والمتجددة. ولهذا السبب – من الناحية الفيزيائية البحتة– فإن استخدام المصدر الأساس سيكون أكثر كفاءة وأقل كلفة من استخدام نواتجه، غير أن المشكلة تكمن في عدم كفاءة تقنيات التحويل الحالية لهذه الطاقات وعدم نضوج المؤسسة الصناعية لاستخدام مثل هذه الأنواع من الطاقات الجديدة والمتجددة.

ولا شك في أن الدول التي تتمتع بمناخ معتدل وصحو (الدول الواقعة بين مداري السرطان والجدي) لها من الإمكانيات التي تجعلها رائدة في مجال استغلال الطاقة الشمسية بأقصى درجة من الكفاءة وبأقل التكاليف.

وبالنظر إلى الخارطة السياسية العالمية فإننا سنجد أن معظم الدول العربية تقع في وسط هذه المنطقة والتي يمكن أن نطلق عليها مصطلح (الحزام الشمسي)، مما يجعلها من أكثر الدول حظاً للريادة في مجال صناعة الطاقة.

ولذا كان لزاماً على علماء هذه الأمة أن يقدموا المادة العلمية الضرورية من دون إسراف أو تقتير لطلاب الجامعات والمعاهد التقنية لتوسيع مداركهم في أهم مجال في تنمية المجتمع ألا وهو مجال صناعة الطاقة. ومن واجب صانعي القرار تذليل كافة الصعوبات وتوفير كافة الإمكانيات لتأسيس بنية تحتية علمية تقنية لتوطين صناعة الطاقة الشمسية في البلدان العربية. ومن هذا المنطلق أصبحت الطاقة الشمسية مادة تُدرس في الجامعات والمعاهد العليا، وفي بعض تلك الدول تم إدراج علوم الطاقة والبيئة في مقرارت المدارس الثانوية، كما تم إنشاء العديد من مراكز بحوث الطاقة الشمسية، وتشييد بعض المحطات الصغيرة التجريبية لطلاب العلم.

وبالرغم من كافة الجهود المبذولة في هذا المجال فأننا نلمس عجزاً كبيراً في توفر المادة العلمية باللغة العربية في مكتباتنا، إلا من بعض الكتب المترجمة، والتي يكون أكثر مترجموها ليسوا مهندسين من ذوي الاختصاص الدقيق، فمعظمهم فيزيائيين، وبالتالي تم تحييد عرض التطبيقات الحرارية للطاقة الشمسية. وفي كافة أنحاء العالم تُدرج مادة الطاقة الشمسية ضمن المقررات العلمية الخاصة بالهندسة الميكانيكية. لأن هذه المادة تعتبر وسيلة جيدة لتعميق فهم الطلاب للعلوم الفيزيائية الهندسية المختلفة مثل: انتقال الحرارة، ميكانيكا الموائع، الديناميكا الحرارية، الاقتصاد الهندسي، علوم البيئة، التحليل العددي. فهذه المادة تعتبر تطبيقاً شاملاً لكل ما تم دراسته في المرحلة الجامعية، وجميع المقررات السالفة الذكر تعتبر أساساً لفهم مادة هذا الكتاب.

إن اختيار مادة هذا الكتاب جاء نتيجة لنتائج الدراسات العلمية لمؤسسات دولية متخصصة في الطاقة الشمسية والتي تؤكد على أن معظم دول الوطن العربي تقع ضمن الحزام الشمسي المفضل للتطبيقات الحرارية للطاقة الشمسية. لهذا السبب وجب علينا توجيه الجهود في هذا الاتجاه وعدم إضاعة فرص استثمارات قد لا تتكرر بسبب عدم إدراك هذه الحقيقة العلمية.

وفي ظل غياب الكتاب المنهجي العربي وقلة وسائل الإيضاح والمحطات التجريبية في كافة الأقطار العربية، وجدت من الضروري أن أقدم مادة علمية منهجية لطلاب الدراسات العليا والمرحلة الجامعية الأولى والمعاهد العليا والمختصصين. ومن خلال تجربتي التدريسية وقيامي بتدريس هذه المادة في أكثر من جامعة (عربية وأجنبية) وعلى مستويات متعددة، فإنني استطعت أن أضع يدي على مواضع الضعف في استيعاب الطلاب لهذه المادة على الصورة المرضية. ولهذا تراني في بعض أجزاء هذا الكتاب أقدم مادة مختصرة ـ معتمداً في ذلك على وجوب وجود خلفية

علمية للقارئ لبعض المواد (السالفة الذكر في الفقرة السابقة) ـــ وفي البعض الأخر أسهب في الشرح وأكثر من الأمثلة والرسوم التوضيحية، آمل بذلك بناء صورة كاملة للنظام المستهدف تحليله في مخيلة الطلاب. كان ذلك الدافع من تأليف هذا الكتاب. ولتحقيق الهدف المنشود، قُمت بتقسيم مادة الكتاب إلى إحدى عشر فصلاً.

تناول الفصل الأول تقنيات الطاقة المتجددة وأثارها البيئية والاقتصادية بصورة مختصرة. كما تضمن هذا الفصل بعض المقارنات لهذه الطاقات من حيث نسبة انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون، تكاليف الإنشاء، التشغيل والإنتاج، المساحات المطلوبة للتشييد. كذلك تم الإشارة إلى أماكن توافر هذه الطاقات في العالم. تم توضيح ذلك بجداول ومنحنيات وخرائط ورسومات لبعض آليات استغلال هذه الطاقات. كما أشتمل الفصل على المعادلات الأساسية لحساب الكميات المتاحة من هذه المصادر وتقدير كمية الإنتاج باستخدام التقنيات المختلفة. وبهذا فإن الفصل الأول يعتبر مقدمة في الطاقات المتجددة. وسيجد الدارس فيه الجواب على السؤال: لماذا نعم للتطبيقات الحرارية للطاقة الشمسية ؟ والذي هو موضوع الكتاب في مجمله.

لأن الشمس هي مصدر كافة الطاقات وأيضاً أساس الحياة على سطح الكرة الأرضية. وتعتبر شدة الإشعاع الشمسي المقياس الحقيقي على مدى توفر وإمكانية استغلال هذه الطاقة الهائلة. وإيجاد قيمة شدة الإشعاع الشمسي يمثل الخطوة الأولى لتقدير جهد هذه الطاقة في الموقع المحدد. لهذا عنى الفصل الثاني بتقديم النماذج الرياضية الخاصة بتقدير شدة الإشعاع الشمسي، كما استعرض أجهزة قياس شدة الإشعاع الشمسي، وكيفية التعامل مع نتائج النماذج الرياضية وقراءات أجهزة القياس للوصول إلى شدة الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح ما باختلاف زوايا الاتجاه والميلان.

وأجاب الفصل الثالث عن كيفية استغلال الطاقة الشمسية ؟ وذلك بشرح مفصل لأجهزة تحويل طاقة الإشعاع الشمسي إلى طاقة مفيدة يمكن استغلالها. بالنسبة للتحويل الحراري، تتمثل هذه الأجهزة في المجمعات الشمسية. تقوم هذه المجمعات بتحويل الطاقة الحرارية في الإشعاع الشمسي إلى زيادة المحتوى الحراري للمائع العامل فيها. وشرح بالتفصيل العمليات الحرارية في المجمعات الشمسية المستوية.

بينما تطرق الفصل الرابع إلى المجمعات الشمسية المركزة. حيث تم توضيح بعض المفاهيم الحرارية الخاصة بالمجمعات الشمسية وخصائصها وتطبيقاتها واستنتاج العلاقات الرياضية الخاصة بكل نوع على أساس الفهم الكامل والصحيح لقانون بقاء الطاقة. كما تم استحداث معامل جديد وهو "معامل تسخين المائع" والذي يبين مدى ارتفاع درجة حرارة المائع العامل في المجمع الشمسي وهو — من وجهة نظرنا- بأهمية المعاملات الأخرى.

ونظراً للتباين الزمني في شدة الإشعاع الشمسي، غالباً ما نلجأ لاستخدام أجهزة تخزين الطاقة الشمسية، لتقليل حدة الاختلاف بين الطلب والعرض، وهناك بيان عن أنواعها وتخصيص لتلك المستخدمة في المنظومات الحرارية المنزلية تناوله الفصل الخامس بالشرح المفصل وباستعراض التحليلات الرياضية الخاصة بالخزانات الحرارية. كما تم إدراج السلوك الحراري لمنظومة تخزين حقيقية لتوضيح أهمية الخزن الحراري في المنظومات الحرارية.

أما الفصل السادس فقد ناقش جانباً حيوياً من التطبيقات الحرارية للطاقة الشمسية، ألا وهو، تحلية المياه. ويعرض هذا الفصل عرضاً شاملاً لكافة تقنيات تحلية المياه بالطاقة الشمسية. ولإجراء التحليل الرياضي (الحراري-الاقتصادي)، تم اختيار النوع التقليدي منها وهو المقطر الشمسي السطحي، كما تم دراسة تأثيرات كافة المتغيرات التصميمية والتشغيلية على إنتاجية المقطر الشمسي.

أما الفصل السابع فتطرق إلى تقنيات استخدام الطاقة الشمسية في مجال التبريد، التكييف والتهوية، وهو التطبيق الذي يلاقي اهتماماً كبيراً من قبل المتخصصين، ولعل السبب يعود إلى ملائمة هذا التطبيق من حيث التنوع الفصلي بين الطلب والعرض، فالطاقة الشمسية متوفرة في الوقت الذي يكون فيه الطلب على التبريد كبيراً، مما يجعل هذا التطبيق الأكثر ملائمة من الناحية التطبيقية والاقتصادية. ففي هذا الفصل تم تحليل منظومة تبريد تعمل على أساس الدورة الامتصاصية. كما تمت محاكاة نظام تكييف هوائي يعمل بالطاقة الشمسية، وكذلك تم عرض بعض النتائج العملية من منظومات شمسية عاملة في بعض مناطق العالم.

يعتبر استخدام الطاقة الشمسية استثماراً اقتصادياً كأي مشروع أخر الغرض منه الربح، ولم يتم التطرق فيما سبق إلى الجانب البيئي للمشروع. غير أنه في الفصل الثامن من هذا الكتاب تم تعيين الكلفة الحقيقية لإنتاج الطاقة الكهربائية من محطات توليد الطاقة الكهربائية التقليدية باعتبار الجانب البيئي. على ضوء استعراضنا السابق، فإن هذا الكتاب يعتبر رائداً في موضوع التقييم الاقتصادي-البيئي للطاقة الشمسية من خلال سرد للتحليل الاقتصادي وصولاً إلى الحجم الأمثل للمنظومة الشمسية بالإضافة إلى الجانب البيئي من خلال عرض كلفة الأضرار البيئية الناجمة من حرق الوقود الأحفوري التقليدي. كما تم في هذا الفصل استحداث مؤشر اقتصادي - بيئي جديد وهو الكلفة النوعية للطاقة، فجاءت نتائج هذا الفصل الأول من نوعها. وبهذا السبيل أصبح للطاقة الشمسية فرصة التنافس مع الطاقات التقليدية الأخرى حتى في الدول المنتجة للنفط.

كما يمكن إنتاج الطاقة الكهربائية من الطاقة الحرارية الشمسية باستخدام عدة تقنيات منها الأبراج الشمسية والمدخنة الشمسية. تم توضيح جميع هذه التقنيات في سياق محتوى الفصل التاسع، من خلال العرض المفصل والتحليل الرياضي المبسط المدعم بمعلومات حقيقية لمحطات عاملة في العالم. كما تم التطرق في هذا

الفصل إلى إنتاج الطاقة الكهربائية مباشرة باستخدام الخلايا الشمسية، وبيان طريقة حساب أبعاد المنظومة الشمسية بالأخذ بعين الاعتبار اختلاف الظروف التشغيلية عن الظروف التجريبية القياسية (STC) والتي قل ما تجدها في المقررات المنهجية بهذا التفصيل والبيان الواضح، والتي تم الحصول عليها تجريبياً في معمل الطاقة الشمسية.

وأستعرض الفصل العاشر التحليل الحراري لعناصر منظومة تسخين مياه وتدفئة منزلية. وسيجد الدارس العمليات الرياضية وطرق الحصول على متغيرات التشغيل والتصميم المثالية وصولاً إلى أقل كلفة للطاقة المنتجة. يعتبر هذا الفصل تطبيقاً جيداً لاختبار التحصيل العلمي للطالب لكل ما تم دراسته سابقاً، كما إننا ننصح بإجراء مشروع بحثي صغير في نهاية الفصل الدراسي، والذي يقوم فيه الطالب بحساب معامل التغطية لمنظومة شمسية خاصة بمنزله، باستعمال أجهزة الحاسوب حتى يتمكن الطالب من ربط تأثير العوامل التشغيلية والتصميمية لكل عنصر على حدة على السلوك الحراري الكلي للمنظومة، كذلك يقوم الطالب ببرمجة جهاز التحكم الخاص بالمنظومة الشمسية.

أما الفصل الحادي عشر فيشرح منظومات شمسية تعتبر في حد ذاتها منظومة هندسية-بيئية، فهي منظومة شمسية موجودة في الطبيعة ويقوم المهندسون بإعادة ترتيبها لتصبح منظومة هندسية، فهذه المنظومات تعتبر منظومة شمسية كاملة فهي تمثل اللاقط الشمسي والخزان الحراري في نفس الوقت، مثل البركة الشمسية، غير أن النوع الثاني "الحفرة الشمسية" يعتبر مصطلحاً جديداً ولم يرد ذكرها سابقاً في أي من الكتب العلمية، ولهذا السبب قمت بالإسهاب في شرحه وبيان تحليله الرياضي.

وختاماً أقول:

"إن الكتاب لا يكتب نفسه"، فمادة هذا الكتاب جاءت من أبحاث وكتب علماء ضرعيين في هذا التخصص، وكنت دائماً أحرص للحصول على المادة

العلمية الحديثة الموثقة من حيث مكان النشر و التأليف، بالإضافة إلى رسالة الماجستير وأطروحة الدكتوراة الخاصة بي كذلك ما كتبته من أبحاث متخصصة في هذا المجال والمنشورة في العديد من المؤتمرات الدولية المتخصصة. كما قمت بعرض معلومات حقيقية في هذا الكتاب من خلال قياسات وأبعاد لبعض المحطات الشمسية العاملة في العالم.

آملاً من وراء ذلك كله، أن يحقق كتابي هذا الهدف المنشود.

والله ولي التوفيق

د. ياسر فتحي نصّار

الفصل الأول
مدخل للطاقة المتجددة

1.1 مقدمة

أصبح للطاقة المتجددة مكانةً مرموقة، لما لها من ايجابيات على الطاقة التقليدية الأحفورية الأخرى. وتعتبر مكملة لأنواع الطاقة الأخرى في العديد من الدول ودون الخوف من نضوبها أو الزيادة في سعرها في المستقبل.

فعلى المستوى العالمي، لم تلعب الطاقة المتجددة دوراً مهماً في توليد الطاقة الكهربائية (الأكثر استخداماً على المستوى الاستراتيجي)، باستثناء طاقة مساقط المياه. ففي عام 1990 ساهمت الطاقة المتجددة في 18% من إنتاج الطاقة العالمي، وكانت المساهمة العظمى من نصيب طاقة الكتلة الحيوية، حيث بلغت تقريباً 11%، وهي عبارة عن حرق الخشب للطهي والتسخين في الدول النامية. بينما حوالي 5% من مجمل الطاقة المتجددة المستخدمة هي طاقة مساقط المياه، والباقي (2%) من طاقة جديدة متجددة بما في ذلك الطاقة الشمسية؛ طاقة الرياح؛ طاقة حرارة جوف الأرض؛ طاقة المحيطات (الناصر، 2003).

يُعنى هذا الفصل بعرض موجز مبسط لهذه الطاقة المتجددة وآثارها على البيئة، كما أشتمل الفصل على مقارنة بينها وبين الطاقة التقليدية من حيث الكلفة، المساحة المطلوبة للتشييد، وكذلك كمية غاز ثاني أكسيد الكربون المنبعث عن توليد الكهرباء بهذه التقنيات.

2.1 الطاقة الشمسية

1.2.1 مصادر الطاقة الشمسية

تعتبر الطاقة الشمسية من أكثر أنواع الطاقة ملائمة للاستخدام في المنطقة العربية، وذلك لتوفر شدة الإشعاع فيها. ويمكن تقسيم تطبيقات الطاقة الشمسية إلى قسمين هما: توليد الطاقة الكهربائية، وتوليد الطاقة الحرارية.

إن مقدار الطاقة الشمسية المتوفرة للاستخدام يختلف من فصل إلى آخر، ومن موقع إلى آخر. إذ يبلغ متوسط الإشعاع الواصل إلى الغلاف الجوي الخارجي للكرة الأرضية $1353\,W/m^2$ (الثابت الشمسي). ونظراً لأن متوسط قطر الأرض هو $6366\,km$ ، فإن مقدار الطاقة الشمسية الساقطة على سطح الأرض تقدر بـ $174{,}000\,TW$ ($1\,TW = 10^{12}\,W$)، وهذا أكثر 17000 مرة من الطاقة الكهربائية الكلية المنتجة على سطح الأرض والتي تبلغ $10\,TW$ تقريباً.

ولكي يكون تطبيق تقنيات استخدام الطاقة الشمسية فعالاً واقتصادياً، فإن ذلك يتطلب شدة إشعاع شمسي سنوي أكبر من $1700\,kW/m^2.year$ أو ما يعادل $4.5\,kW/m^2.day$. فللوطن العربي مصدر وافر من الطاقة الشمسية تكفي لتكون مصدراً أساسياً لتغذية العالم بأسره بالطاقة الكهربائية، خصوصاً وأن متوسط ساعات سطوع الشمس فيه تصل إلى ما يقرب من 3200 ساعة سنوياً ومتوسط إشعاع شمسي يقدر بـ $550\,W/m^2$ ، أي أن متوسط شدة الإشعاع اليومي تقدر بـ $4.8\,kW/m^2.day$.

الشكل (1.1) يبين المناطق المفضلة للتطبيقات الشمسية، ويبدو واضحاً أن الوطن العربي هو الأفضل مكاناً لهذه التطبيقات.



شكل (1.1) خريطة العالم تبين أنسب المناطق لاستغلال الطاقة الشمسية، والتي تتجاوز فيها شدة الإشعاع الشمسي السنوي $1700\ kW/m^2.year$

هناك طريقتان لتوليد الطاقة الكهربائية عن طريق الطاقة الشمسية هما: الطريقة الأولي هي الطريقة المباشرة وذلك باستخدام الخلايا الشمسية؛ وهذه تولد الكهرباء مباشرة من الشمس عن طريق ظاهرة التأثير الكهروضوئي، والثانية هي الطريقة الغير مباشرة، وذلك عن طريق المحطات الحرارية لتوليد الطاقة الكهربائية.

إن توليد الكهرباء باستخدام الخلايا الشمسية لا يسبب ضجيجاً أو يبعث غازات أثناء عملها. وحالياً، هناك $400\ MW$ تقريباً من الطاقة الكهربائية تتولد عن طريق الخلايا الشمسية. وينمو سوق تقنية الخلايا الشمسية بمعدل 25% سنوياً، والذي يقلل انتشارها بصورة أكبر هو الكلفة العالية للطاقة المنتجة، وذلك نظراً لارتفاع سعر تصنيع مسطحات الخلايا الشمسية، وقلة كفائتها.

أما التقنية الحرارية للطاقة الشمسية، فهي عبارة عن تحويل الطاقة الشمسية إلى حرارة عن طريق اللواقط أو العاكسات الشمسية، لتوليد البخار ومن تم تدوير العنفة البخارية والذي بدورها تدور المولد الكهربائي. وهذه الطريقة هي الأكثر شيوعاً واعتمادية، والأقل كلفة من الخلايا الشمسية. وهناك العديد منها في العالم وأكبرها في الوطن العربي في مصر (ما زالت تحت الإنشاء حتى تاريخ تأليف الكتاب). الشكل (2.1) يبين صورة جوية لمحطة توليد كهروحرارية بقدرة $354\, MW_e$ وبمساحة $7\, km^2$ في صحراء Mojave بولاية كاليفورنيا في الولايات المتحدة الأمريكية. تزود هذه المحطة الشبكة العامة للكهرباء بطاقة تصل إلى $800\times10^6\ kWh$ سنوياً، وسعر الطاقة المنتجة $0.12\ \$US/kWh$.



شكل (2.1) صورة لمحطة كهروحرارية تعمل بتقنية اللواقط ذات القطع المكافئ القيعانية في ولاية كاليفورنيا بالولايات المتحدة الأمريكية

3.1 طاقة الرياح

1.3.1 مصادر طاقة الرياح

تعتبر طاقة الرياح من أهم مصادر الطاقة البديلة والمتجددة، وأن ما يميزها عن أنواع الطاقة التقليدية هو أنها طاقة نظيفة ولا تلوث البيئة. تقوم محطات طاقة الرياح بتحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة كهربائية أو ميكانيكية. أما الطاقة الميكانيكية فتستخدم لضخ مياه الآبار للاستخدامات الزراعية والصناعية والمنزلية في المناطق النائية.

بدأ استخدام طاقة الرياح لتوليد الطاقة الكهربائية مع بداية الثمانيات من القرن العشرين، وبقدرات بسيطة. والتطور السريع في استخدام طاقة الرياح دل على نجاح هذه الطريقة. ففي بداية التسعينات بلغ مجموع قدرات المحطات الهوائية المركبة 3,400 *MW*، ثم أخذت تزداد مساهمة طاقة الرياح في الإنتاج العالمي حتى وصل مجموع القدرات المركبة في عام 2000 إلى 17,300 *MW*، واستناداً إلى إحصاءات مؤسسات طاقة الرياح العالمية، فإن مجموع القدرات المركبة حتى نهاية عام 2002 بلغ 31,128 *MW*. إلا أن المتاح مازال أكبر بكثير من المستخدم، حيث تشير البحوث العلمية إلى أن مجموع الطاقة الممكن الحصول عليها نظرياً من الرياح تقدر بما يكافئ تقريباً 172 مليون برميل نفط يوميا أو 40 مليون طن فحم وهذه الطاقة تفوق بمعدل 15 مرة ما يستهلكه العالم كله من الطاقة. أما على مستوى الوطن العربي، وبالرغم من توفر متوسط سرعات للرياح تناسب تطبيقات توليد الطاقة الكهربائية في معظم الدول العربية، إلا أن استغلال هذه الطاقة ظل مقتصراً على بعض الدول وبقدرات إنتاج منخفضة وبدون تطوير؛ حيث بلغ مجموع القدرات المركبة لطاقة الرياح في مصر 63 *MW*؛ وفي تونس 10 *MW*؛ وفي المغرب 54 *MW* (Europe wind energy association).

تعتبر سرعة الرياح أهم عنصر في دراسة الجدوى الاقتصادية لاستخدام طاقة الرياح ومن ثم اتخاذ القرار بإنشائها. ففي الحالات العامة وعند معدلات سرعة رياح أكبر من $4\,m/s$ على ارتفاع $10\,m$ (عادة ما توضع أجهزة قياس سرعة الرياح في محطات الأرصاد الجوي على هذا الارتفاع)، يمكن استخدام طاقة الرياح لتوليد الطاقة الكهربائية وبفعالية، كما يمكن وربط محطات طاقة الرياح مع الشبكة الكهربائية، والرياح ذات السرعات الأقل من ذلك يمكن استخدامها لتوليد الطاقة الميكانيكية، واستخدامها في رفع المياه من الآبار في المنشآت الزراعية والصناعية (Nassar, Salem, 2002).

إن قدرة محطة طاقة الرياح P تتناسب طردياً مع مكعب سرعة الرياح V، كثافة الهواء ρ، مساحة المروحة A كفاءة المنظومة η (حاصل ضرب كفاءة المولد η_g في كفاءة صندوق السرعة η_r)، C_P معامل استخدام الرياح وهو يعتمد إلى حد كبير على شكل المروحة وعوامل تصميمية أخرى ولأكثر التصاميم تُعتمد قيمته 0.593 و تصل في بعض التطبيقات إلى 0.4-0.45. وتعطى طاقة محطة الرياح بالعلاقة التالية:

$$P = \frac{1}{2} \eta\, A\, \rho\, C_P\, V^3 \quad , \quad W \qquad (1.1)$$

حيث: $A = \pi/_4 . D^2$ (D يمثل قطر المروحة m)

أما إنتاج الطاقة الميكانيكية من طاقة الرياح، فتحسب باستخدام المعادلات الرياضية التي تربط بين الطاقة الميكانيكية اللازمة لتدوير مضخة المياه والارتفاع وعمق بئر معين (بما يعرف بفقد الارتفاع h) بكمية $Q\ l/\min$. وتكون طاقة المضخة الميكانيكية P_p المطلوبة هي:

$$P_p = \frac{Q\,H}{6.12\,\eta_p} \quad , \quad W \qquad (2.1)$$

حيث η_p – كفاءة المضخة ، H الفقد في الضغط الناتج من ارتفاع عمود الماء H_g m، والاحتكاك $(K.Q)$، وبهذا يكون الفقد الكلي على الصورة: $H = H_g + K.Q^2$. وتحسب طاقة الرياح الضرورية لتغطية هذا الحمل من العلاقة:

$$P_w = \frac{P_p}{\eta_m} \qquad (3.1)$$

حيث P_W – قدرة محطة طاقة الرياح ، η_m– كفاءة أجهزة نقل الحركة من محطة الرياح إلى المضخة. وبالاستعانة بمنحنيات القدرة للمضخات يمكن اختيار مواصفات المضخة المناسبة لرفع كمية ماء من البئر إلى الارتفاع المحدد عند متوسط سرعة رياح معينة (Boccazzi, 1988).

وهناك ثلاثة معاملات هامة لتصنيف استخدام مراوح الرياح وهي:

1. وفرة الرياح: وهي الفترة الزمنية التي يعمل فيه التوربين الهوائي (المروحة)، وتحسب قيمته من المعادلة التالية:

$$\text{الوفرة} = \frac{\text{الوقت الكلي - وقت عمل التوربين}}{\text{الوقت الكلي}} \qquad (4.1)$$

وقد ارتفعت النسبة بسبب التطور في تقنية المراوح الهوائية من 18% في عام 1981 إلى 98% في عام 1995 (Elliott, et al., 1991).

2. سعة المعامل: وهي النسبة بين الطاقة الفعلية المنتجة من وحدة التوربين عندما يعمل فترة t من الزمن إلى الطاقة المنتجة من وحدة التوربين عندما يعمل فترة x من الزمن. ويعطى هذا المعامل بالمعادلة التالية:

$$\text{سعة المعامل} = \frac{\text{الطاقة المنتجة الفعلية للتوربين عندما يعمل فترة } t \text{ من الزمن}}{\text{الطاقة المنتجة من التوربين عندما يعمل فترة } x \text{ من الزمن}} \qquad (5.1)$$

علماً بأن سعة المعامل النموذجية تتراوح بين 25% ـ 30%

3. الطاقة المنتجة سنوياً لكل متر مربع: وهي النسبة بين الإنتاج السنوي للطاقة من كل وحدة توليد إلى المساحة التي تعترض فيها ريش الرياح وتقاس بوحدة (kWh/m^2) وهي تساوي:

$$\text{(6.1)} \quad (kWh/m^2) \text{ الطاقة المنتجة} = \frac{\text{متوسط الناتج السنوي من الطاقة}}{\pi \times \text{مساحة الريش}}$$

وعليه فإذا كانت متوسط سرعة الرياح السنوية لموقع معين هي $7\ m/s$، فإن الطاقة المنتجة سنوياً لطاحونة هوائية تُغطي ريشاتها مساحة $1000\ m^2$ تساوي $1.2\ GWh$ تقريباً.

2.3.1 استغلال طاقة الرياح وأثره على البيئة

يمكن تلخيص العلاقة بين البيئية واستغلال طاقة الرياح في النقاط التالية:

1. المساحة المطلوبة من الأرض: تتطلب حقول طواحين الهواء مساحة كبيرة، فمعظم حقول الرياح تحتل مساحة $0.1-1\ km^2/MW$. ونموذجياً، تكون المسافة الفاصلة بين طاحونة وأخرى من 5 إلى 10 مرة قطر الطاحونة الهوائية الواحدة. لذا فإن المساحة المطلوبة لتغطيها المراوح هي 25 إلى 100 مرة من المساحة التي تغطيها كل مروحة.
2. الضجيج: حقول الطواحين الهوائية تُسبب نوعين من الضجيج: الأول ميكانيكي، ويأتي من صندوق التروس؛ والثاني ديناميكي ـ هوائي، ويأتي من تدفق الهواء حول ريش التوربين الهوائي. فالطواحين القديمة كانت تصدر ضجيجاً عالياً ولكنه انخفض بصورة كبيرة في الآونة الأخيرة. فالضجيج الصادر من مروحة هوائية هو أقل بكثير من ذلك الضجيج الناتج من محرك سيارة.

3. التداخل مع الاتصالات اللاسلكية: تؤثر الطواحين على الأجهزة اللاسلكية إذا ما كانت قريبة منها. إلا أنه يمكن التخفيف من حدة هذا التداخل باستخدام المخمدات الكهرومغناطيسية، وخير دليل على ذلك مطار كاستروب بمدينة Copenhagen حيث تتواجد طواحين الهواء بالقرب من أجهزة الاتصال الخاصة بالمطار.
4. التأثير البصري: تشير دراسة في الدنمارك إلى أن 77% من الناس يرتاحون لمنظر الطواحين، بل أن 48% من الناس مستعدون لدفع كلفة أكثر لهذا النوع من تقنيات إنتاج الطاقة الكهربائية، إلا أن البعض من الناس لا يرتاح لمنظر هذه الطواحين.
5. التأثير على الطيور والحيوانات: هذا العامل يجب دائما أن يهتم به المصممون عند اختيار مكان إنشاء المحطة . حيث لا يجوز اختيار مكان المحطة في مسارات هجرة الطيور والحيوانات أو أماكن استراحتها الموسمية. وعموما احتمالية اصطدام سرب طيور مهاجر بمحطة طاقة رياح يكون نادر الحدوث وذلك لأن الطيور المهاجرة غالبا ما تطير على ارتفاعات عالية و أعلى بكثير من ارتفاعات أبراج مولدات طاقة الرياح. الحيوانات البرية سوف تترك المكان وذلك بسبب تغير بيئتها أما بالنسبة للحيوانات الداجنة فإنها سرعان ما تألف الوضع وكثيرا ما تشاهد الماشية ترعى بجانب الأبراج بأمان.

4.1 طاقة الكتلة الحيوية

1.4.1 مصادر طاقة الكتلة الحيوية

المقصود بالكتلة الحيوية هو كل أنواع المواد المشتقة من النباتات التي يمكن استخدامها لإنتاج الطاقة مثل الخشب، النباتات العشبية، المحاصيل الزراعية ومخلفات الغابات.

ومصادر هذه الطاقة يتم إنتاجه خلال عملية التمثيل الضوئي؛ وهي قيام خلايا النبات بإنتاج الكربوهيدرات باستخدام الماء، ثاني أكسيد الكربون وضوء الشمس. هذه الكربوهيدرات هي مصادر للطاقة، فهي تُستخدم في النبات للنتح، النمو، والخزن. وهناك ما يقارب $220\,Gton$ من الكتلة الحيوية الجافة يتم إنتاجها خلال عملية التمثيل الضوئي سنوياً، وهذا يعادل قيمة حرارية قدرها $4{,}000\ EJ$ ($1\,EJ\,(\text{Exajoul}) = 10^{18}\ J$)، وهذه الطاقة تعادل عشر أضعاف الطاقة التي يحتاجها العالم سنوياً.

كفاءة إنتاج الطاقة المخزونة في الكتلة الحيوية خلال عملية التمثيل الضوئي تُقدر على النحو التالي:

1. 3.3% في نباتات المجموعة (C_3)، مثل القمح، الأرز، حبوب الصويا، والأشجار.
2. 6.7% في نباتات المجموعة (C_4)، مثل الذرة، السرغوم (وهو نبات يشبه الذرة)، وقصب السكر.

وتشير المراجع (Hall, et al., 1993) إلى أن العالم ينتج سنوياً 475 مليون طن من الذرة (في أفريقيا 34 مليون طن، وفي أسيا- من دون الصين- 36 مليون طن)، و 597 مليون طن من القمح (14 مليون طن في أفريقيا، وفي أسيا - من دون الصين- 103 مليون طن)، ومن الأرز 532 مليون طن (في أفريقيا 11 مليون طن، وفي أسيا - من دون الصين- 290 مليون طن)، ومن الخشب والفحم ما يقدر بـ 1249 مليون طن.

2.4.1 تقنيات إنتاج الطاقة من الكتلة الحيوية

إن التقنيات المستخدمة لتوليد الطاقة من الكتلة الحيوية تشابه تلك التي تستخدم لإنتاج الطاقة من الفحم. وبمقارنة هذين النوعين من الوقود نرى أن، قيم

الحرارة العالية للكتلة الحيوية تتراوح من $17.5GJ$ لكل طن (من المواد العشبية والبرسيم السوداني) إلى قيمة تتراوح بين $23-26GJ$ لكل طن من الخشب. بينما فحم البتيومينوس، واللجنايت لها قيمة حرارية تتراوح بين $30-35GJ$ لكل طن إلى $23-62GJ$ لكل طن، على التوالي. والتقنيات المستخدمة حالياً لإنتاج الطاقة من الكتلة الحيوية تتمثل في:

1. حرق مباشر للكتلة الحيوية.
2. الحرق بتحويل الكتلة الحيوية إلى غاز، لاستخدامه في التوربينات البخارية أو محركات الديزل.
3. تحويل الكتلة الحيوية إلى وقود سائل للتوربينات الغازية ومحركات الديزل.

3.4.1 استغلال طاقة الكتلة الحيوية وأثره على البيئة

إن توليد الكهرباء والحرارة من الكتلة الحيوية فيه العديد من الميزات مقارنة بتلك الناتجة من الفحم. فعلى سبيل المثال، إن كمية الرماد في الكتلة الحيوية أقل بكثير عما هو في الفحم، كما أن الرماد الناتج من حرق الكتلة الحيوية خال من المواد السامة. والكتلة الحيوية تنفث كبريتاً أقل بكثير ($0.01\%-0.1\%$)، أما في الفحم فهو ($0.5\%-5\%$)، لذا فإن إنبعاث غاز ثاني أكسيد الكبريت الناتج من حرق الكتلة الحيوية أقل مما ينتجه حرق الفحم. وكذلك فإن الكتلة الحيوية أكثر تفاعلاً من الفحم ولذا فإنه بالإمكان تحويلها إلى غاز بسهولة أكثر من الفحم مما يؤدي إلى زيادة كفاءة الطاقة.

ومع ذلك، فإن حرق الكتلة الحيوية يبعث جسيمات من أكاسيد النيتروجين (NO_x). أما غاز ثاني أكسيد الكربون المنبعث خلال عملية الحرق فإنه يمكن استخدامه في نمو كتل حيوية جديدة ! وهذا يُشكل إتزاناً بيئياً إذا كان قطع الأشجار

موزوناً ومحسوباً وليس جائراً، وهذا خلاف إزالة الغابات الاستوائية حيث يسبب ذلك في نفث 2 $Gton$ من غاز CO_2 في الجو سنوياً.

5.1 الطاقة الهيدرولوجية

1.5.1 مصادر الطاقة الهيدرولوجية

إن المتوفر من مصادر الطاقة المائية على المستوى العالمي والذي يمكن استغلاله تقنياً يقدر بـ 12×10^{6} MW سنوياً، وهذا يعادل تقريباً ما يتم إنتاجه من الكهرباء على المستوى العالمي سنوياً. ففي عام 1995 تم إنتاج 2.6×10^{6} MW من الطاقة المائية، وهو يعادل 20% من الكهرباء المنتجة عالمياً.

تعتبر هذه الطاقة ضمن أحد أنظف أنواع الطاقة المتجددة والأكثر كفاءة لإنتاج الكهرباء، ولكن عندما يتم استخدامها على نطاق واسع جداً فإنها قد تترك آثاراً بيئية سلبية. ومع ذلك تظل الطاقة المائية كأحد عناصر إنتاج الطاقة الكهرومائية في المستقبل.

لقد صنفت منظمة الأمم المتحدة للإنماء الصناعي محطات إنتاج الطاقة الكهرومائية كالتالي:

محطات كبيرة : أكبر من 10 MW

محطات صغيرة : تتراوح بين $10\ MW \div 1\ MW$

محطات صغيرة جداً : تتراوح بين $1\ MW \div 100\ kW$

محطات صغيرة للغاية : أقل من 100 kW

لذلك نجد السدود عند محطات توليد الكهرباء من مساقط المياه المتدفقة تأخذ أشكالاً وأحجاماً متعددة مثل شكل القوس أو الحذوة، وهذه الخزانات تُصنف حسب ارتفاعها، حجمها، سعة خزانها، وسعتها الكلية لإنتاج الكهرباء. إذ يوجد

ما يقرب من 27 سداً في العالم بارتفاع أقل من $200\,m$، 25 خزاناً تحبس $30\,km^3$ من الماء، كما إن هناك 600 سداً بارتفاع أكبر من $15\,m$ تحت الإنشاء.

ففي المحطات الكهرومائية، تتحول طاقتا الوضع والحركة للمائع (مثل الماء الجاري أو الساقط) إلى طاقة ميكانيكية باستخدام التوربينات، وهذا التحول يأخذ محله بكفاءة داخلية عالية، ويمكن تقدير القدرة الرئيسية أو الأولية من المحطة كالتالي:

$$P = \rho\, g\, h Q \eta \qquad (7.1)$$

حيث تمثل P القدرة، ρ كثافة الماء، g تمثل عجلة الجاذبية الأرضية، h هو ارتفاع سطح الماء عن مستوى سطح البحر، Q التدفق الحجمي للماء في الثانية، η كفاءة المحطة، وهي حاصل ضرب كفاءة المولد، كفاءة القناة الهيدروليكية التي تُسيّر تدفق الماء خلال المحطة، وكفاءة التوربين، وحاصل ضرب هذه الكفاءات يكون في حدود 80% إلى 85%.

2.5.1 استغلال الطاقة الهيدرولوجية وأثره على البيئة

لقد لوحظت الآثار السلبية لطاقة الماء في السنوات الأخيرة، الأمر الذي جعل بعض الدول، مثل سويسرا، تضع ضوابطاً على أربعة أنهار لحمايتها من أي خطر أو عبث، حتى لو كانت هناك حاجة للكهرباء، لأن الضرر سيكون أكبر من النفع.
ومن ضمن التأثيرات البيئية للمحطات الكهرومائية هي:

1. تأثير الإنشاء: يحتاج إنشاء محطة كهرومائية إلى عدد كبير من العمال، وصل إلى 35000 عاملاً في محطة (Tueurui) في البرازيل، كما أن نقل الموظفين إلى مناطق نائية قد يكون له ضرر اجتماعي سيء.
2. غمر الأراضي: إن معظم مشاريع الإنتاج الكهرومائي يتطلب بناء خزان لتجميع الماء، حيث يؤثر ذلك على النظام البيئي للمناطق المجاورة، ولأن

الخزان يمتد بعيداً عن النهر، فإن الأراضي المحيطة غالباً تكون أكثر قيمة من الأراضي الأبعد بصفة عامة، وهذه الأراضي القيمة للأسف يتم غمرها أثناء عملية التخزين.

3. التبخير والتأثيرات المناخية: إن حجز الماء خلف السد يجعله ساكناً مما يزيد من كمية تبخره. حيث بلغت كمية المياه المتبخرة سنوياً في سد أسوان بمصر (بمساحة $5200 km^2$) مثلاً حوالي $14 km^3$.
4. إعادة توطين السكان: إن إنشاء محطات كهرومائية يتطلب - كما سبق ذكره - توطين عمال كثيرين، فعلى سبيل المثال في الصين، بمشروع (Three Gores)، تم إعادة توطين 1.2 مليون شخص، كذلك في ماليزيا في مشروع (Bakon) تم إعادة توطين 9000 شخص، أضف إلى ذلك فإن إعادة توطين العمال لغرض إنشاء المحطة يدخل ضمن كلفة المشروع، حيث رفعت كلفة توطين 45 ألف شخص في البرازيل من سعر الكيلووات بنسبة 10%.
5. الترسبات: إن الخزانات لا تجمع الماء فقط وإنما تعيق تدفق الرواسب، ومع مرور الزمن فإن هذه الرواسب تقلل من سعة الخزان، وهذا بدوره يقلل من عمر المحطة الافتراضي. ومعالجة ذلك يكلف دولاراً واحداً تقريباً لكل متر مكعب من الماء المعالج.
6. تأثير الفلورا - الأزهار، الفيونا - الحيوانات: إن غمر أراضي من أجل إنشاء خزان للمحطة يؤثر على البيئة المحلية الطبيعية البرية والبحرية.
7. غازات الانبعاث الدفيئة: لا تصدر المحطات الكهرومائية أية غازات، ولكن عند طمر منطقة خشبية بالماء من أجل إنشاء خزان، فإن ذلك يزيد من نسب ثاني أكسيد الكربون في الجو. فالخضرة تحت الماء ستتحلل وترجع إلى سابق عهدها ثاني أكسيد الكربون وميثان، وهي من الغازات الدفيئة (الحابسة للحرارة).

وللعلم، فقد أدى إنشاء محطة (Bakon) في ماليزيا إلى إنبعاث 1.2 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون، بينما نتج عن تحلل الكتلة الحيوية في الخزان إلى إنبعاث 27 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون، وهذا يعني، أنه خلال عمر هذه المحطة تم إنبعاث 28.2 مليون طن من غاز ثاني أكسيد الكربون، علماً بأن محطة توليد كهرباء تقليدية بقدرة ($2400\,MW$) تنفث سنوياً 10.5 مليون طن إذا كانت تستخدم 30% فحم، 10% نفط، 60% غاز طبيعي.

6.1 طاقة حرارة جوف الأرض

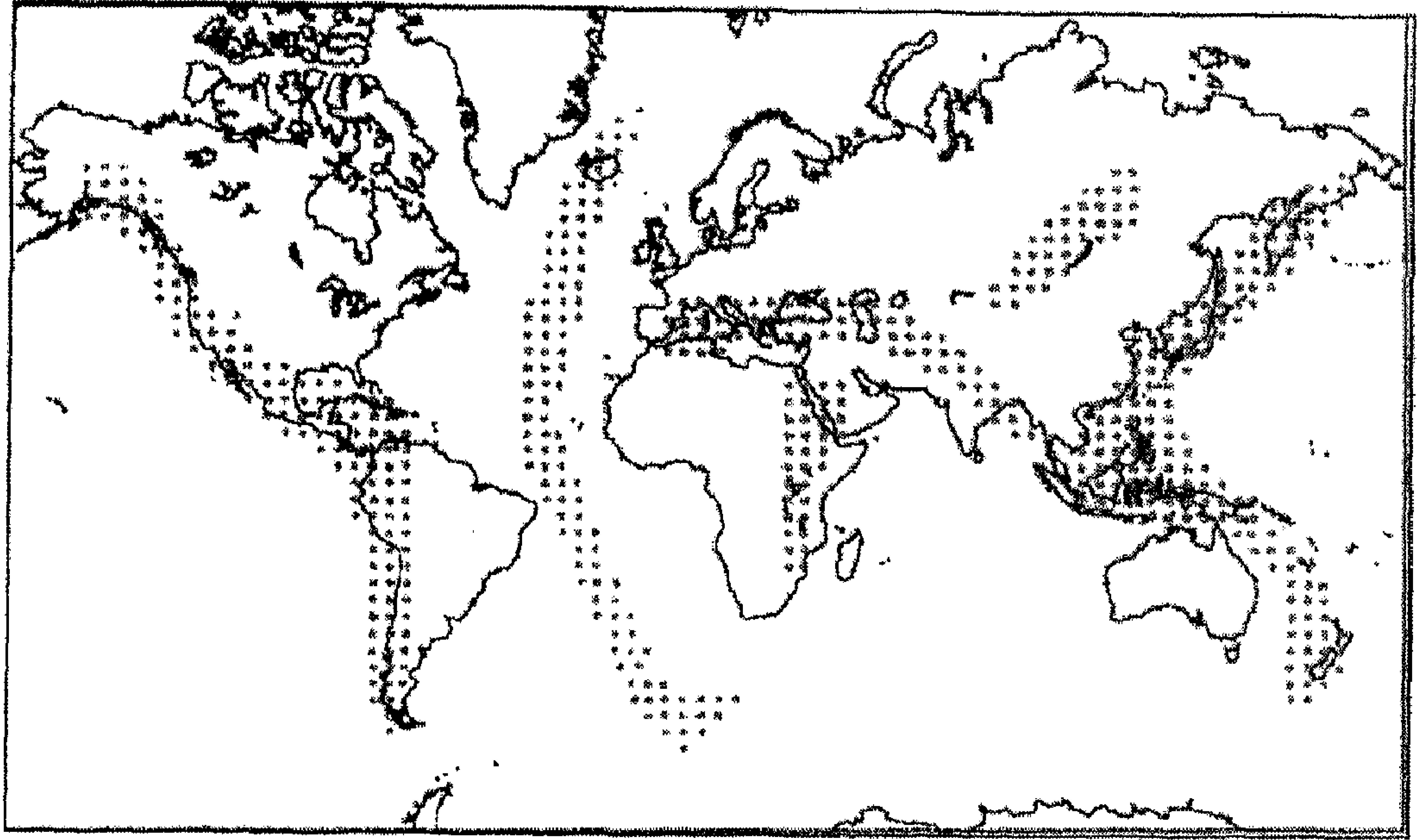
1.6.1 مصادر طاقة حرارة جوف الأرض

إن الحرارة الهائلة القابعة تحت القشرة الأرضية تعتبر مصدراً مهماً من مصادر الطاقة المتجددة، وهذه الحرارة تتجلى وتبرز نفسها من خلال الانفجارات البركانية، الينابيع الحارة، وبعض الظواهر الجيولوجية الأخرى.

ومما لا شك فيه أن حفر آبار عميقة تنطلق منها حرارة يمكن استغلالها في إنتاج البخار لتدوير التوربينات البخارية. وحالياً، فإن مساهمة هذا النوع من الطاقة في توليد الطاقة الكهربائية يمثل أقل من 1% مقارنة بأنواع الطاقات الأخرى.

يوضح الشكل (3.1) المناطق الرئيسة من الأرض التي تقع على حدود الأسطح التكتانوية، وهي مناطق نشطة وغير مستقرة، حيث إن الحرارة في باطن الأرض تصل إلى $3500^{\circ}C - 4500$، أما في أسفل القشرة الأرضية فإن الحرارة تتراوح بين $200^{\circ}C - 1000$، وفي بعض المناطق تكون هذه الحرارة قريبة جداً من سطح الأرض. ولكون أن أعمق حفرة تم حفرها حتى الآن هي بعمق $12\,km$، في حين تتطلب تقنية توليد الكهرباء من حرارة جوف الأرض عمقاً قدره $2\,km$، فإنه من منطلق اقتصادي قد لا توجد جدوى من حفر آبار بعمق أكبر من $5\,km$

للحصول على الطاقة، فعلى عمق $1\,km$ تكون درجة الحرارة $40°C$ بينما على عمق $3\,km$ تتراوح درجة الحرارة بين $90°C-100$.



شكل (3.1) المناطق الرئيسة من الأرض والواقعة على حدود الأسطح التكتانوية التي يمكن استغلال طاقة حرارة باطن الأرض بها

وتجدر الإشارة إلى أن معدل تدفق الحرارة من باطن الأرض إلى سطحها هو نحو $0.06W/m^2$، ومعظم هذه الحرارة ناتجة من النشاط الإشعاعي في قشرة الأرض بنسبة 70%، والباقي من حرارة باطن الأرض بنسبة 30%، حيث يُقدر مقدار الحرارة المتدفقة من كل الأرض حوالي $83,000TWh$. وتشير دراسة (Freeston, 1995) إلى أن هناك 70 دولة يمكن لها أن تستغل مصادر حرارة جوف الأرض على المستوى التجاري، منها فقط 29 دولة تستخدم هذه الطاقة حالياً ومن بينها الجزائر ($100MW$) وتركيا ($140MW$).

2.6.1 استغلال طاقة جوف الأرض وأثره على البيئة

من بين كافة تقنيات الطاقة المتجددة المختلفة، فإن طاقة جوف الأرض لها تأثيرات بيئية مشابهة لتلك الناجمة من الطاقة الأحفورية. والغازات الناتجة من هذه التقنية هي: كبريتيد الهيدروجين، كلوريد الهيدروجين، ثاني أكسيد الكربون، وقليل من غاز الميثان، والأمونيا، والرادون، وبعض العناصر السامة مثل الزئبق المذاب في البخار والماء في جوف الأرض. ويعتبر غاز كبريتيد الهيدروجين — وهو الأكثر إزعاجاً برائحته الشبيهة برائحة البيض الفاسد – ساماً إذا وصل إلى مستويات عالية. غير أن نسب إنتاجها يكون أقل منه في الوقود الأحفوري. علماً بأن محطات جوف الأرض تنتج غاز ثاني أكسيد الكربون بمعدل $0.05-0.07 kg/kWh$، بينما في الغاز الطبيعي بمعدل $0.55 kg/kWh$ وفي الفحم بمعدل $1.13 kg/kWh$.

7.1 طاقة المحيطات

1.7.1 مصادر طاقة المحيطات

تحمل المحيطات طاقة واعدة هائلة ويمكنها توليد الكهرباء دون نفث غازات في الهواء الجوي. فالتطوير مستمر لهذا النوع من الطاقة المتجددة، إلا أن ما يقلل إتساع استخدامها هو كلفتها وكفائتها والتي تحد كثيراً من الاستثمار في هذا النوع من الطاقة المتجددة.

إن طاقة المحيطات تظهر على هيئة ثلاثة أنواع من الطاقة وهي:

- طاقة المد والجزر؛
- طاقة الأمواج؛
- الطاقة المخزونة في التدرج الحراري؛

وفيما يلي موجز عن كل نوع منها.

2.7.1 طاقة المد والجزر

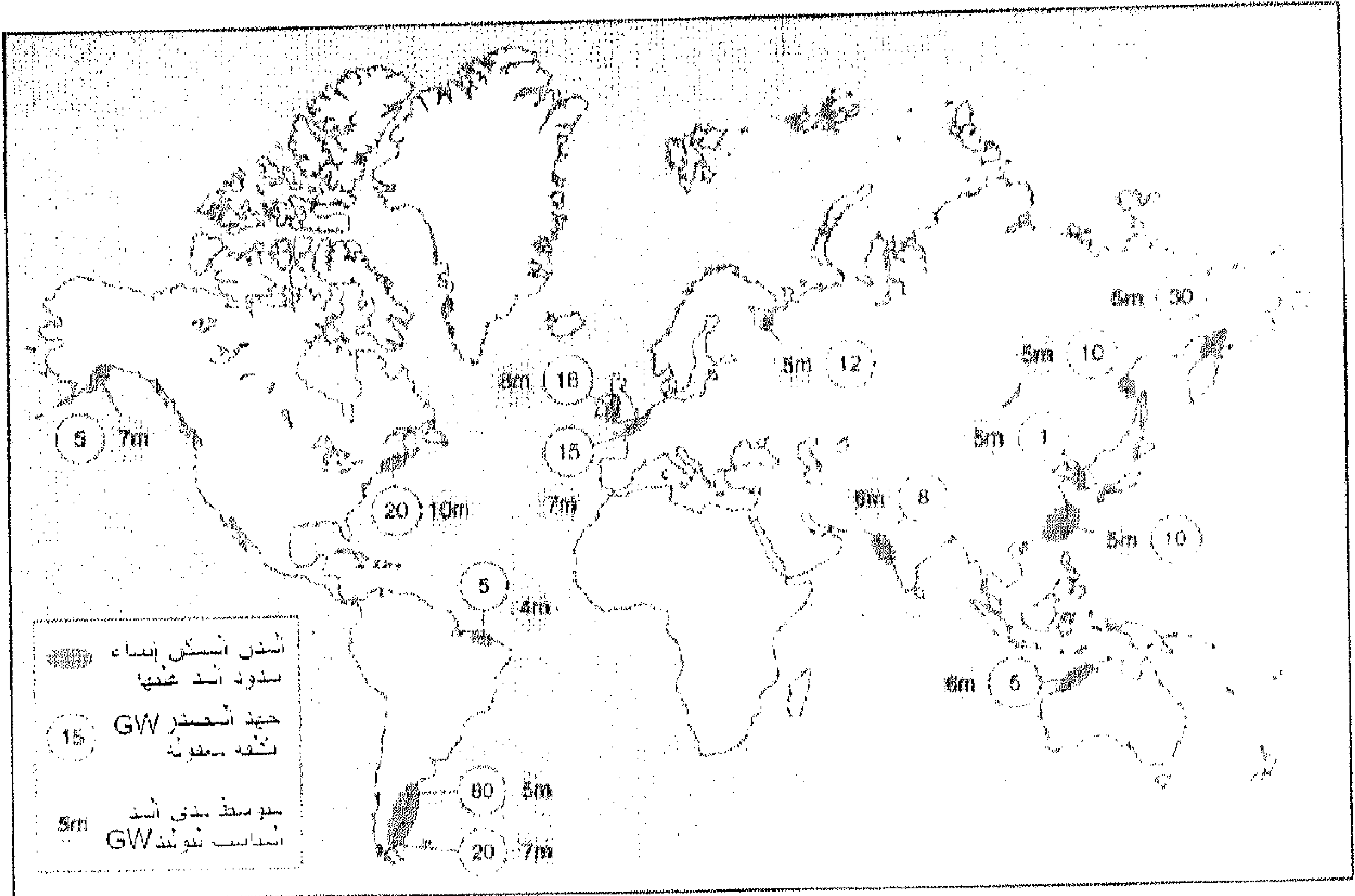
من بين الأنواع الثلاثة السالفة الذكر، اتسمت طاقة المد والجزر بالانتشار التجاري، فعلى كل رقعة من المحيط يُسيّر المد والجزر وفق دورة مدتها 12 ساعة و 25 دقيقة. فكل 14 يوماً يكون الفرق بين ارتفاع وانخفاض المد كبيراً. ومقدار المد الربيعي يصل إلى ضعف الجزر المحاقي. وهناك دورات أخرى تؤثر في المد والجزر (Godfrey, 1996). على سبيل المثال، هناك فترة زمنية مدتها 178 يوماً بين أعلى مد ربيعي في مارس وسبتمبر، وهذان المدان يختلفان بمقدار 11%. كما إن هناك دورة مدتها 19 سنة حيث يتغير ارتفاع المد وانخفاضه بنسبة 4%. وعلى المستوى العالمي فإن مجموع مصادر طاقة المد والجزر يعادل 5 إلى 10 مرات مما هو متوفر في أوروبا أو $5000TWh-10000$.

إن ارتفاع منسوب مياه البحر وانخفاضه يمكن استغلاله كمصدر مهم من مصادر الطاقة المتجددة. فاستخدام ظاهرة المد والجزر لتوليد الطاقة يعود لتاريخ سابق موغل في القدم، حيث كانت تتوفر طواحين تعمل على تدفق مياه البحر أثناء المد والجزر لطحن حبوب الذرة في بريطانيا وفرنسا، أما الآن فإن طاقة المد والجزر تُستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية باستخدام توربينات تديرها مياه تصب من أعالي السدود. ويشير الشكل (4.1) إلى المناطق التي يمكن استغلالها لتوليد الطاقة الكهربائية من طاقة المد والجزر، إذ يصل ارتفاع المد إلى أكثر من $4m$، حيث يبين الشكل أن المغرب، وموريتانيا مؤهلتان لاستغلال مثل هذه الطاقة، إذ يصل المد إلى حوالي $7m$. إن أكثر طاقة وضع E متوفرة عند كل مد، فإذا كان كل الماء المتدفق خلال التوربين له مركز ثقل على ارتفاع $R/2$ من سطح البحر، فإن طاقة الوضع تُقدر بالمعادلة التالية:

$$E = m\ g\ h \qquad , \qquad (J) \qquad (8.1)$$

$$P = \rho\ g\ A\ R(R/2) = \rho\ A\ g\ R^2/2T \qquad , \qquad (W) \qquad (9.1)$$

حيث تمثل ρ كثافة الماء، A مساحة الخزان، g عجلة الجاذبية الأرضية، R ارتفاع الماء، T زمن المد (حوالي 6 ساعات). ولقد أنشاء الفرنسيون في عام 1967 سداً لتوليد الكهرباء باستخدام طاقة المد والجزر في منطقة Brittany بالقرب من St Malo حيث كانت قدرة المحطة $240MW$، وبعد إجراء بعض التحسينات عليها تم رفع القدرة إلى $15GW$. ويُقدر مصدر هذه الطاقة في أوروبا بحوالي $53.8GW$ ما يعادل $105TWh/year$، ومعظم ذلك في بريطانيا $25.2GW$، وفرنسا $44.4GW$.



شكل (4.1) المناطق التي يمكن استغلالها لتوليد الطاقة الكهربائية من طاقة المد والجزر

3.7.1 طاقة الأمواج

لطاقة الأمواج نوعين: الأول - طاقة حركة الأمواج عند تحركها أماماً، والثانية - طاقة الوضع لهذه الأمواج في ازاحتها رأسياً كلما مرت الموجة على نقطة معينة.

ويعبر عن جهد الكهرباء في الموج بوحدة كيلووات لكل متر من صدر الموجة kW/m، وهو المعدل الذي تنتقل فيه الطاقة في اتجاه حركة انتشار الموجة، ويعبر عنها بالمتر مقاساً من العمود على اتجاه الانتشار. ويكون أعلى تركيز لطاقة الأمواج بين خطي عرض $40^\circ \div 60^\circ$ في كل من نصفي الكرة الأرضية (الشمالي والجنوبي). كما إن الساحل الغربي من أوروبا وأمريكا، وسواحل نيوزيلندا، واليابان ملائمة لاستغلال الأمواج لإنتاج الطاقة الكهربائية (Cavanagh, etal., 1993).

ويتم تقدير جهد طاقة الأمواج من المعادلة التالية:

$$P = \frac{\rho\, g^2\, H^2\, T}{32\,\pi} \qquad , \qquad (W/m) \qquad (10.1)$$

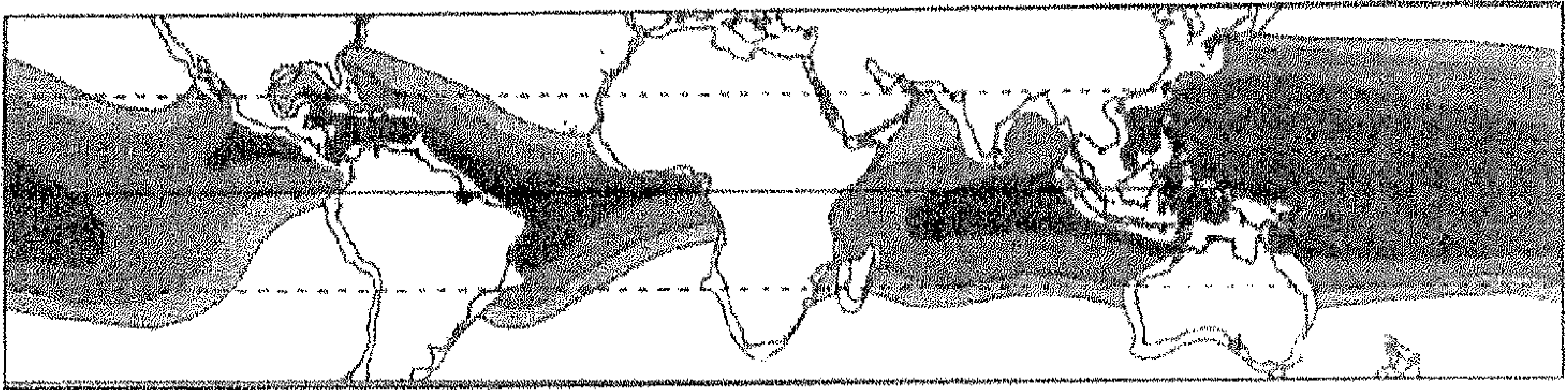
حيث تمثل ρ كثافة ماء البحر، g عجلة الجاذبية الأرضية، H إرتفاع الموج (من قاع إلى قمة الموجة)، T مدة مرور الموجة. كما يمكن تقريب المعادلة السابقة لتكون على الصورة التالية:

$$P = H^2\, T \qquad , \qquad (kW/m) \qquad (11.1)$$

وتتواجد محطات توليد الطاقة الكهربائية من طاقة الأمواج في النرويج، بريطانيا ($2\,MW$)، الصين ($8\,kW$)، الهند ($75\,kW$)، الدنمارك، السويد، البرتغال ($500\,kW \div 1\,MW$)، أسبانيا ($11\,MW$)، ايرلندا، أمريكا ($200\,kW$).

4.7.1 طاقة التدرج الحراري في المحيطات

تقوم تقنية طاقة التدرج الحراري في المحيطات على استغلال الفرق في درجات الحرارة بين سطح المحيط (في المناطق الاستوائية حوالي $25\,^{\circ}C$)، وتلك التي على عمق $1km$ $(5\,^{\circ}C)$. وبما أن ما يقرب من ربع الأشعة الشمسية الواصلة إلى سطح الأرض تُمتص في المحيطات، فإنه يمكن استغلال هذه الطاقة عملياً إذا كان الفارق في درجات الحرارة $20\,^{\circ}C$ أو أكثر. وهذا يعني محدودية أو عدم جدوى استغلال هذه الطاقة في المناطق البعيدة عن خط الاستواء، كما يشير إلى ذلك الشكل (5.1).



شكل (5.1) مصادر الطاقة الحرارية في المحيطات. تظهر الخارطة متوسط الفارق في درجة الحرارة بين السطح وعمق $900m$. المناطق الفاتحة يكون عندها الفارق مسوياً للصفر؛ والمساحات ذات اللون الأكثر قتمة عندها يكون فارق درجات الحرارة حوالي $0-4.4^{\circ}C$؛ ويكون الفارق أكبر من $4.4^{\circ}C$ في المناطق ذات اللون الغامق جداً

وتقدر مساحة المحيطات التي يمكن استغلال طاقة تدرج درجات الحرارة بين السطح والعمق بها بحوالي $60\times10^{6}\ km^{2}$، والقدرة المتوفر من طاقة تدرج درجات الحرارة يعادل ضعفي المتوفر من طاقة المد والجزر أو من طاقة الأمواج أو من طاقة الرياح!

5.7.1 استغلال طاقة المحيطات وأثرة على البيئة

إن طاقة المد والجزر طاقة غير ملوثة نسبياً، بل أن فائدتها تكمن في حماية بعض المناطق من الفيضانات، لأن كافة المؤشرات الحالية لهذه التقنية ايجابية. بينما يعيب طاقة الأمواج عرقلتها لحركة السفن كما أنها مصدر إزعاج للصيادين. أما بالنسبة لطاقة تدرج درجات حرارة المحيط فإنها قد تؤثر في شكل حركة تدفق مياه المحيط المجاورة للمحطة، كما أنها يمكن أن تؤدي إلى زيادة في انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون من الطبقات العميقة في المحيط أثناء عملية ضخ الماء الساخن والبارد خلال نظام المحطة.

8.1 مقارنة بين تقنيات مختلف أنواع الطاقة المتجددة وأنواع الطاقة التقليدية الأخرى

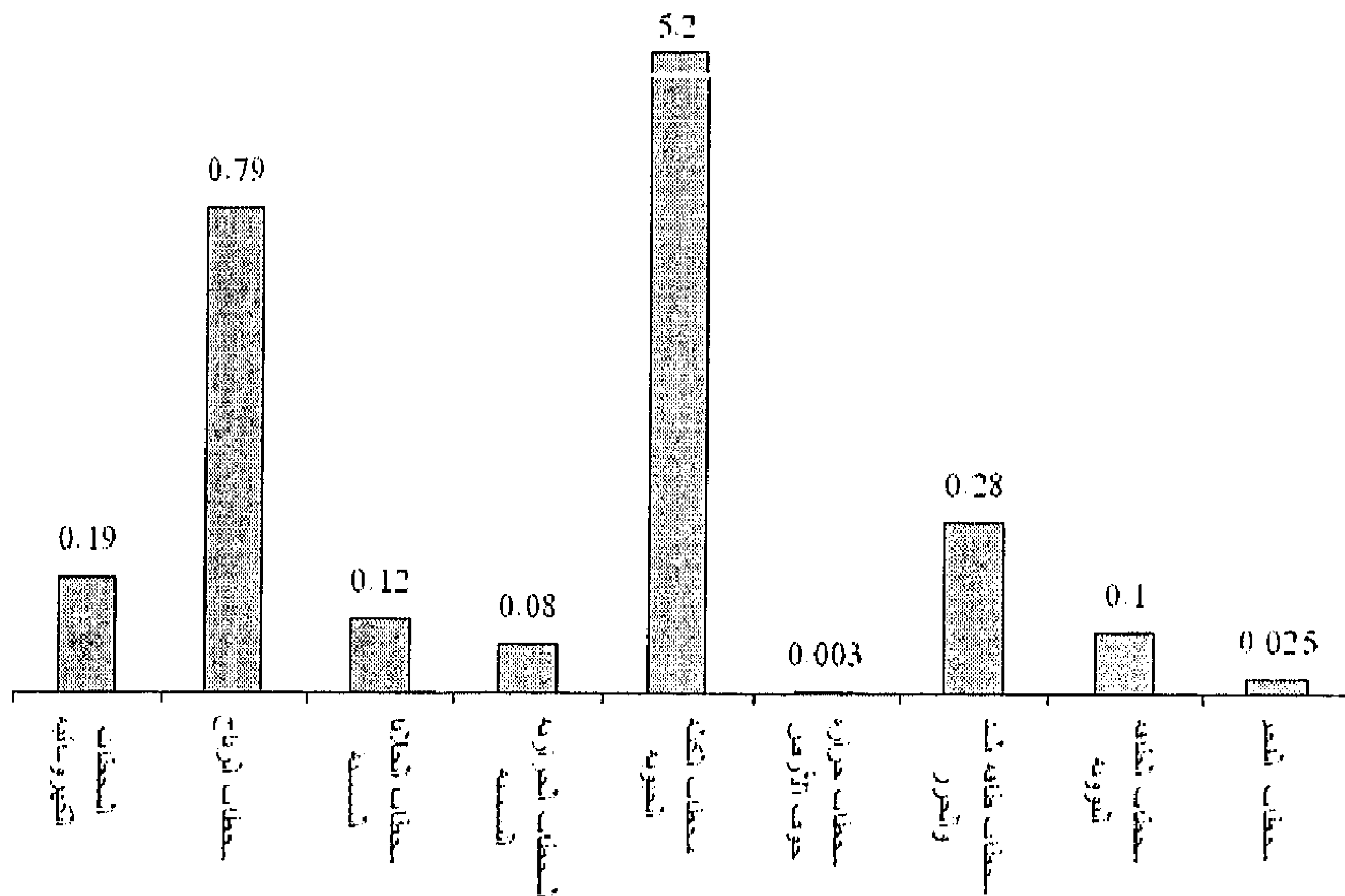
في هذا الجزء سيتم إجراء مقارنة بين تقنيات مختلف أنواع الطاقة المتجددة فيما بينها وكذلك مقارنتها مع أنواع الطاقة التقليدية الأخرى، لكي يعرف متخذ القرار جميع الحقائق التي تساعده في اتخاذ القرار الأفضل اقتصادياً وبيئياً واجتماعياً. تشمل المقارنة المساحة المطلوبة للإنشاء، الكفاءة، كلفة التشييد، كلفة الوحدة الكهربائية المنتجة، و مقدار انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون.

1.8.1 مقارنة المساحات المطلوبة لمحطات توليد الكهرباء بتقنيات الطاقة المتجددة

يعرض الجدول (1.1) المساحات المطلوبة لكل نوع من أنواع تقنية الطاقة. بافتراض أن كل محطة تنتج 876 GWh سنوياً، وهذا يعادل تقريباً كمية الكهرباء المتولدة خلال عام من محطة بقدرة 100 MW تعمل بسعة 100%. كما يعرض الشكل (6.1) مخططاً بيانياً للنتائج المدرجة في الجدول.

جدول (1.1) المساحات المطلوبة لمحطات تعمل بطاقات مختلفة (الناصر، 2003)

التقنية	مساحة المحطة (km^2)	القدرة المشيدة (MW)	الطاقة المنتجة (GWh)	المساحة/القدرة (km^2/MW)	المساحة المعادلة للمحطة (km^2)
المحطات الكهرومائية					
محطة- Three Gorges	1000	18200	127550	0.07	7
محطة – Itaipu	1340	1260	88300	0.13	13
محطة – Bakun	700	2400	16785	0.37	37
محطات الرياح	79	300	876	0.79	79
محطات الخلايا الشمسية	12	580	876	0.12	12
المحطات الحرارية الشمسية	0.68	30	71.8	0.08	8
محطات الكتلة الحيوية	1.0	10	1.7	5.2	515
محطات حرارة جوف الأرض				0.003	0.3
محطات طاقة المد والجزر	17	240	540	0.28	28
محطات الطاقة النووية	1/10	1000	7884	0.001/0.01	0.1/1
محطات الفحم	1/40	1000	7884	0.001/0.04	0.1/4



شكل (6.1) مقارنة المساحات المطلوبة لمحطات تعمل بأنواع الطاقة المختلفة، قدرة كل محطة هي $100\ MW$، **وتعمل باستطاعة** 100٪ ($876\ GWh$)، **الوحدات هنا** (km^2/MW)

2.8.1 مقارنة كفاءات مختلف أنواع تقنيات الطاقة المتجددة وأنواع الطاقة التقليدية الأخرى

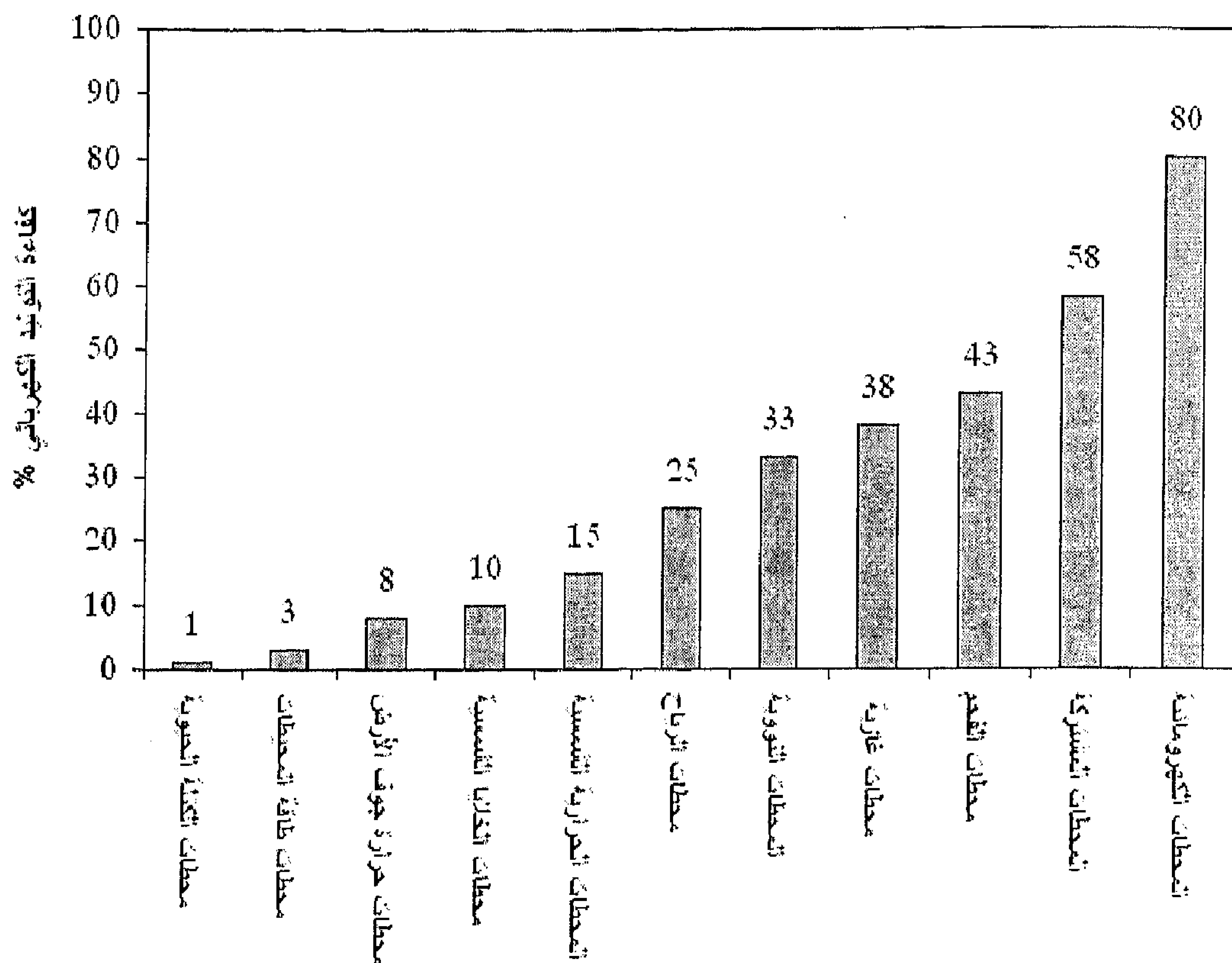
يستعرض الجدول (2.1) مقارنة كفاءات لعمليات توليد الطاقة الكهربائية عن طريق عدة تقنيات، وتعتبر جميع هذه القيم نموذجية، إذ أن القيم الفعلية من محطات فردية يمكن أن تتغير كثيراً عن تلك المدرجة في الجدول، وهذا يعتمد على عمر المحطة، الأجهزة المستخدمة، وعوامل أخرى. ويتم حساب الكفاءة من المعادلة المعروفة التالية:

$$\eta = \frac{\text{كمية الكهرباء المنتجة}}{\text{طاقة الوقود الحرارية}} \qquad (12.1)$$

فعلى سبيل المثال، في حالة الكتلة الحيوية، فإنه تم حساب الكفاءة بالأخذ في الاعتبار الأشعة الشمسية الساقطة واعتبار كيف تحولت إلى كتلة حيوية، والتي بدورها، تم حرقها لتوليد الطاقة الكهربائية. كما يبين الشكل (7.1) رسماً بيانياً لما ورد في الجدول.

جدول (2.1) مقارنة لكفاءات تقنيات طاقات متجددة وطاقات تقليدية (الناصر، 2003)

التقنية	متوسط الكفاءة (٪)	مدى الكفاءة (٪)
محطات الكتلة الحيوية	1	0.5–0.3
محطات طاقة المحيطات	3	2–6
محطات حرارة جوف الأرض	8	5–15
محطات الخلايا الشمسية	10	5–15
محطات حرارية شمسية	15	10–20
محطات الرياح	25	15–35
محطات نووية	33	30–35
محطات غازية	38	30–40
محطات الفحم	43	35–45
محطات الدائرة المزدوجة	58	50–60
محطات كهرومائية	80	70–85



شكل (7.1) مقارنة كفاءة التوليد الكهربائي لعدة تقنيات

3.8.1 مقارنة تكاليف مختلف أنواع تقنيات الطاقة المتجددة وأنواع الطاقة التقليدية الأخرى

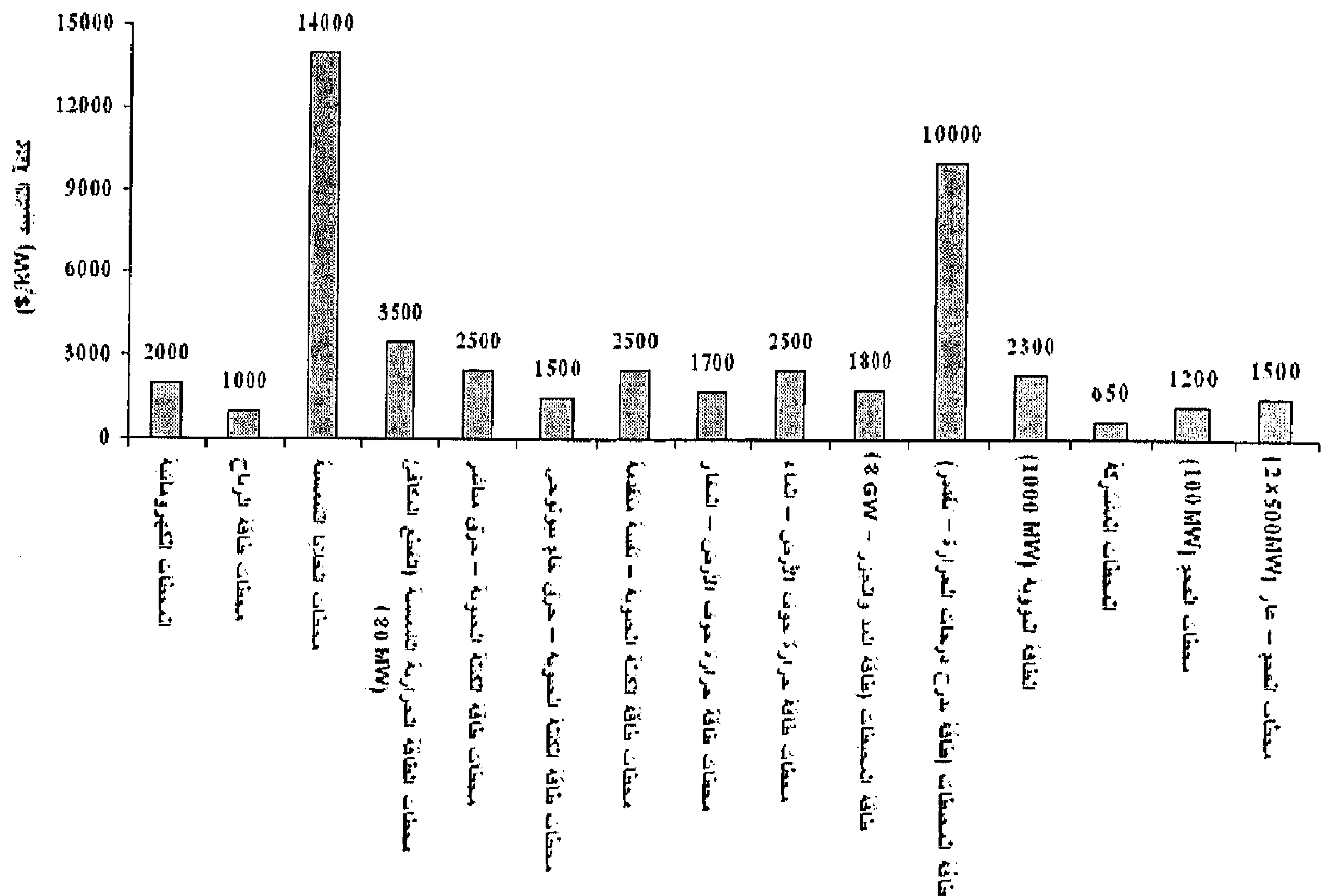
يشير الجدول (3.1) إلى مقارنة لكلفة التشييد بوحدة الدولار لكل كيلووات، وكلفة التشغيل والصيانة بوحدة السنت لكل وحدة كهربائية منتجة (*kWh*)، وكلفة توليد الكهرباء بوحدة السنت لكل وحدة كهربائية منتجة (*kWh*). كما يوضح الشكل (8.1) كلفة التشييد لبعض تقنيات الطاقة المتجددة والطاقة التقليدية الأخرى بوحدة الدولار لكل كيلووات قدرة، كما يوضح الشكل (9.1) كلفة إنتاج الطاقة الكهربائية لعدة تقنيات.

جدول (3.1) تكاليف إنشاء محطات توليد الطاقة الكهربائية باستخدام التقنيات المختلفة (الناصر، 2003)

التقنية	كلفة التشييد ($\$US/kW$)	كلفة التشغيل والصيانة ($cent/kWh$)	كلفة توليد الكهرباء ($cent/kWh$)
محطات كهرومائية	600–2000		2–8
محطات طاقة الرياح	800–1000	0.05–0.1	5–7
محطات الخلايا الشمسية	6000–14000	0	50–75
محطات الطاقة الحرارية الشمسية (القطع المكافئ $80\,MW$)	2800–3500		12–17
محطات طاقة الكتلة الحيوية – حرق مباشر	2500		14
محطات طاقة الكتلة الحيوية – حرق خام بيولوجي	1500		8
محطات طاقة الكتلة الحيوية – تقنية متقدمة	400–2500		6–10
محطات طاقة حرارة جوف الأرض – البخار	1600–1700		4–6، 2–8
محطات طاقة حرارة جوف الأرض – الماء	2400–2500		6 ،2–8
محطات طاقة حرارة جوف الأرض – الضغط الجوفي			11
محطات طاقة حرارة جوف الأرض – الصخور الحارة الجافة			4–19
طاقة المحيطات (طاقة المد والجزر – $8 \div 6\,GW$)	1800		8
طاقة المحيطات (طاقة تدرج درجات الحرارة – تقدير)	10000	1	12–25
الطاقة النووية ($1000\,MW$)	2100–2300		2–4
المحطات المشتركة	450–650	0.35	3–4
محطات الفحم ($100\,MW$)	1200		4–5
محطات الفحم – غاز ($2\times 500\,MW$) مع معالجة للغاز	1200–1500	1.5–2	5–10

4.8.1 مقارنة انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون من مختلف أنواع تقنيات الطاقة المتجددة وأنواع الطاقة التقليدية الأخرى

يوضح الجدول (4.1) مقدار انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون بـالكيلوجرام الناجم من إنتاج kWh من محطـات توليـد الطاقـة الكهربائيـة المسـتخدمة لتقنيـات الطاقة المتجددة وتقنيات الطاقة التقليدية الأخرى.



شكل (8.1) مخطط لكلفة تشييد بعض محطات توليد الطاقة الكهربائية ($\$US/kW$)

شكل (9.1) كلفة الطاقة الكهربائية المنتجة من بعض محطات توليد الطاقة الكهربائية ($cents/kWh$)

جدول (4.1) مقدار انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون (بالكيلوجرام) الناجم من إنتاج $1kWh$ خلال العمليات المختلفة باستخدام التقنيات المختلفة (الناصر، 2003)

التقنية	انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون ($kgCO_2/kWh$)			
	التشييد	تجهيز الوقود	التشغيل	الإجمالي
المحطات الكهرومائية ($20MW$)	0.004	0.0	0.0	0.004
محطات طاقة الرياح (متوسط 37 توربين - $10kW/3MW$)	0.020	0.0	0.0	0.020
محطات الطاقة النووية ($1300\ MW$)	0.009	0.016	0.0	0.025
محطات طاقة حرارة جوف الأرض - ثنائي			0.0	

التقنية	انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون ($kgCO_2/kWh$)			
	التشييد	تجهيز الوقود	التشغيل	الإجمالي
محطات طاقة حرارة جوف الأرض – وميضي			0.06	
محطات طاقة حرارة جوف الأرض – ينابيع أمريكيا			0.033	
محطات طاقة حرارة جوف الأرض – ينابيع المكسيك			0.175	
محطات طاقة حرارة جوف الأرض – ينابيع ايطاليا			0.380	
محطات الخلايا الشمسية ($300kW$) – استوائي	0.1	0.0	0.0	0.1
محطات الخلايا الشمسية ($300kW$) – أوروبي	0.2	0.0	0.0	0.2
الغاز الطبيعي/ دورة مشتركة ($300MW$)	0.01	0.02	0.35	0.38
الغاز الطبيعي/ دورة مشتركة ($400MW$)	0.01	0.02	0.44	0.47
الغاز الطبيعي/ توربين غازي ($150MW$)	0.01	0.03	0.54	0.58
النفط ($400MW$)	0.01	0.06	0.69	0.76
الفحم/ (Bituminous - $200MW$,PFBC)			0.79	
الفحم/ (Bituminous - $300MW$,Gasifier)	0.01	0.05	0.73	0.79
الفحم/ دورة بخار (Bituminous - $700MW$)	0.01	0.05	0.76	0.82
الفحم/ (Lignite - $300MW$,Gasifier)	0.01	0.04	0.86	0.91
الفحم/ دورة بخار (Lignite - $800MW$)	0.01	0.04	1.00	1.04
خشب/ دورة بخار			0.19	
(Biogases)/ دورة بخار			0.18	

المراجع

1. وهيب عيسى الناصر، مستقبل الطاقات المتجددة، الجمعية العالمية للطاقة الشمسية - القسم العربي-(2003).

2. Boccazzi Arnaldo, Design and testing of an optimized wind electric pumping system, Proceedings of energex 88, the global energy forum, Tripoli-Libya, November 25-30, 1988, pp. XVIII 9-18.

3. Cavanagh, J.E., Clarke, J.H., Price, R., *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, Ed. Johansson, T.B., et al., Island Press, Washington, Chapter 14, 513 (1993). "Ocean Energy Systems."

4. Elliott, D.L., Wendell, L.L. Gower, G.L., *An Assessment of the Available Windy Land Area and Windy Potential in the Contiguous United States*, Report No. DE91018887, Pacific Northwest Laboratories, Richland, Washington 99352, August (1991).

5. Godfrey, B., *Renewable Energy, Power for Sustainable Future*, the Open University and Oxford Press, (1996).

6. Hall, D.O., Rosillo-Calle, R.H., Williams, W., *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, Ed. Johansson, T.B., et al., Island Press, Washington, Chapter 14, 593 (1993). "Biomass for Energy: Supply Prospects."

7. http//www.ewea.org. (Europe Wind Energy Association).

8. Nassar, Y.F., Salem, A.A., The Proceedings of the Second Symposium on Scientific Research Outlook in the Arabic World 2002, Scientific Research and Technology Development in the Arabic World, March 24-27 (2002), Sharjah, UAE. "Power system status and renewable energy potential in Libya."

الفصل الثاني
الإشعاع الشمسي

1.2 مقدمة

تعتمد المنظومات الحرارية الشمسية بشكل كبير على عملية تجميع الطاقة الشمسية. فيما يعتمد أداء المجمعات الشمسية على عدة عوامل أهمها: مقدار واتجاه الأشعة الشمسية الساقطة على سطح المجمع. الغرض من هذا الفصل هو تعريف الزوايا الشمسية المختلفة ذات العلاقة وتقديم العلاقات الرياضية الضرورية لإيجاد شدة الإشعاع الشمسي الساقط على سطح ما في فترة زمنية محددة.

2.2 طبيعة الشمس

تعتبر الشمس أقرب نجم للأرض، وهي تمدنا بالطاقة الحرارية اللازمة لاستمرار الحياة على الكرة الأرضية وكذلك توفر قوة التجاذب الضرورية لكي يبقى كوكبنا مستقراً في مداره. للشمس كتلة تقدر بحوالي 11.99×10^{30} kg (3.3×10^5 مرة كتلة الأرض). أما التركيب الكيميائي للشمس فيتكون بصورة رئيسية من غازي الهيدروجين حوالي (80%) والهليوم حوالي (19%)، هذان العنصران يكونا تحت ضغط وقوة جذب هائلتين الذي يحافظ على تماسك كتلة الشمس ببعضها. عموماً يعتبر التفاعل النووي ـ الحراري لذرات الهيدروجين لتكوين الهليوم، هو مصدر الطاقة الشمسية. إن طبيعة عملية إنتاج الطاقة في الشمس ليست بالأهمية الكبيرة في موضوعنا.

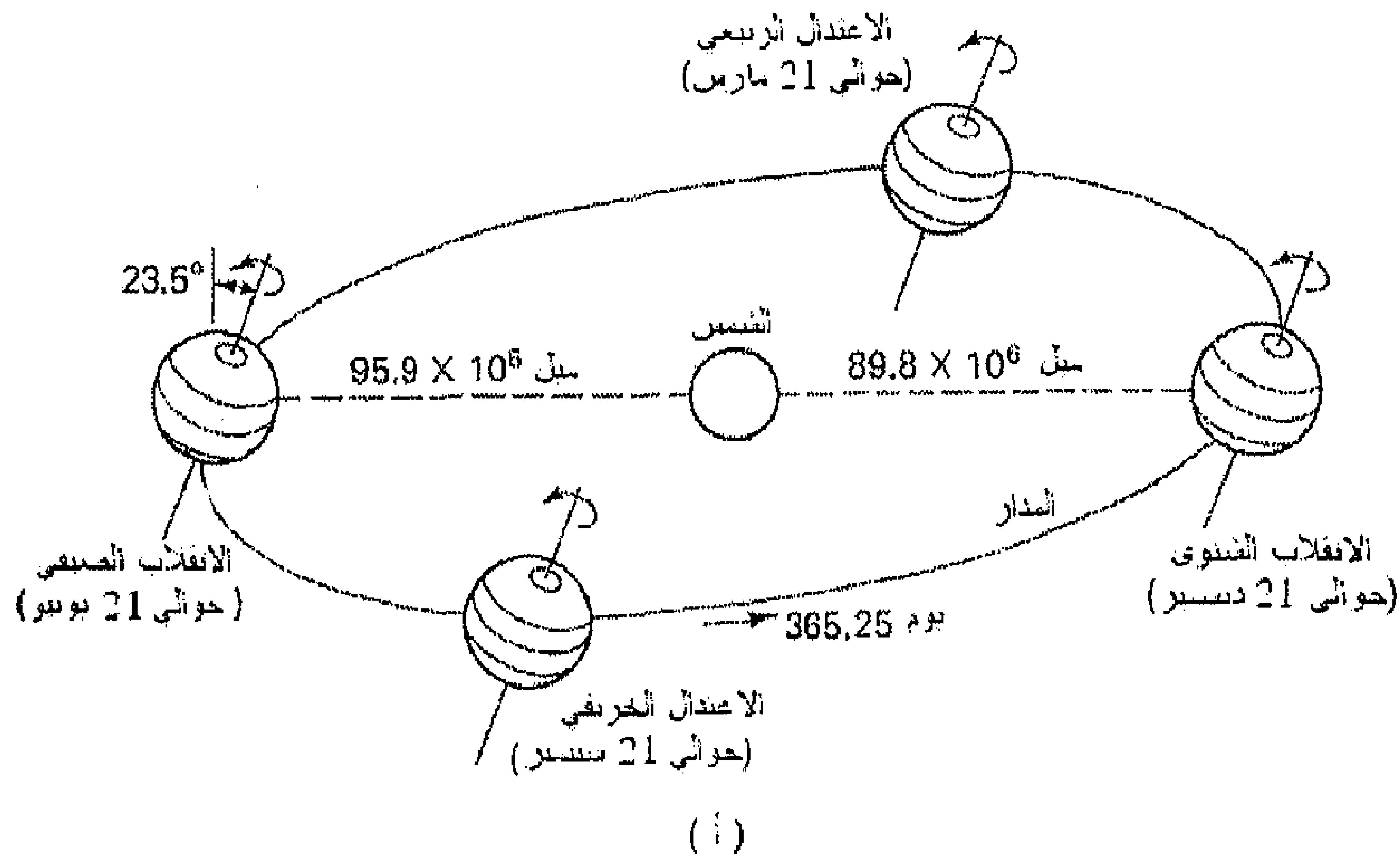
فالشمس هي كرة بنصف قطر 6.96×10^8 m (109 مرة نصف قطر الأرض)

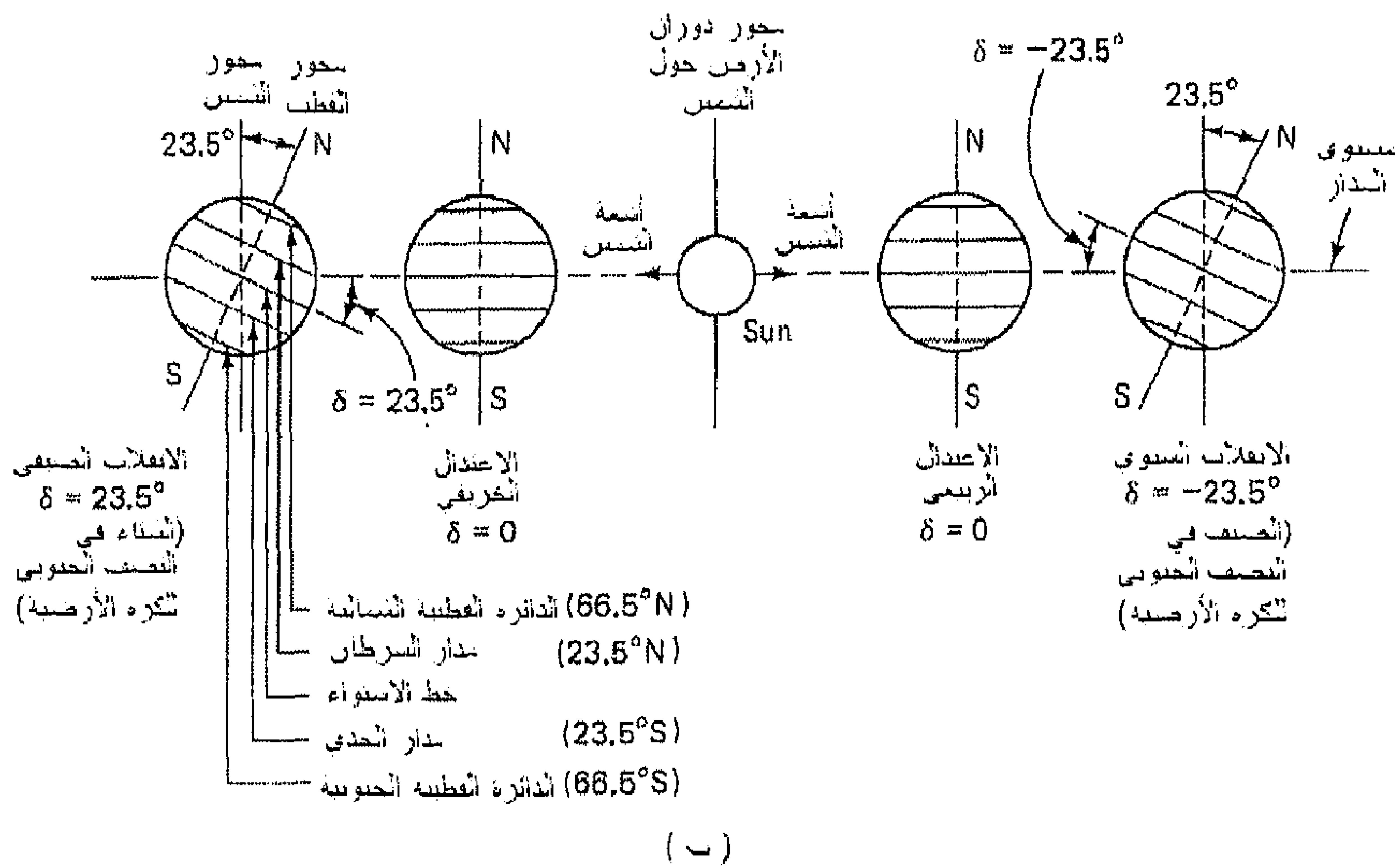
وتتكون من عدة طبقات غازية، والتي تُسخن باستمرار من مركزها. الطبقة الغازية الخارجية هي التي تشع الطاقة الحرارية للمجرة الشمسية كجسم أسود عند درجة حرارة $5760\ K$ بينما يكون مركز الشمس عند درجة حرارة $20\times10^{6}\ K$. كمية الطاقة المنبعثة من الشمس تقدر بحوالي $3.8\times10^{23}\ kW$، كنتيجة لتحويل $4.3\times10^{9}\ kg/\sec$ من الكتلة إلى طاقة. من هذا المجموع، فقط ما قيمته $1.7\times10^{14}\ kW$ يُستقبل على سطح الأرض، والتي تفوق 5000 مرة من مجموع الطاقات الأخرى المنتجة على الأرض. 30% من هذه الكمية تنعكس عائدة إلى الفضاء، 47% يتحول إلى حرارة وتشع مرة أخرى للفضاء، 23% هي طاقة لدورة التبخير، وأقل من 0.5% تصبح طاقة حركية تتمثل في الرياح والأمواج والبناء الضوئي في النباتات. مجموع الطاقة الشمسية الأرضية يمثل فقط 1/3 مجموع الطاقة الشمسية خارج الغلاف الجوي الأرضي في السنة، وما قيمته 70% من الطاقة تسقط في المحيطات والبحار، وهي كمية هائلة من الطاقة وتعادل 2000 مرة مما تستهلكه البشرية.

3.2 علاقة مسار الأرض والشمس

تدور الأرض حول الشمس في مدار يشبه القطع الناقص، المسافة بين مركز الأرض ومركز الشمس غير ثابتة فتكون عند أقصى قيمة لها يوم 21 يونيو ويسمى بالانقلاب الصيفي وتقدر المسافة بحوالي $95.9\times10^{6}\ mile$، بينما تكون أدنى قيمة لها يوم 21 ديسمبر ويسمى بالانقلاب الشتوي، وتقدر المسافة بحوالي $89.8\times10^{6}\ mile$. الشكل (1.2-أ) يوضح مخطط للموضع النسبي للشمس والأرض في أوقات مختلفة من السنة. بينما تعمل الأرض دورتها اليومية حول نفسها ودورتها السنوية حول الشمس، فالشمس كذلك تدور حول محورها تقريباً مرة واحدة كل شهر أرضي. الشكل (1.2-ب) يبين تخطيطا لمواضع الدوائر القطبية الشمالية والجنوبية ومداري

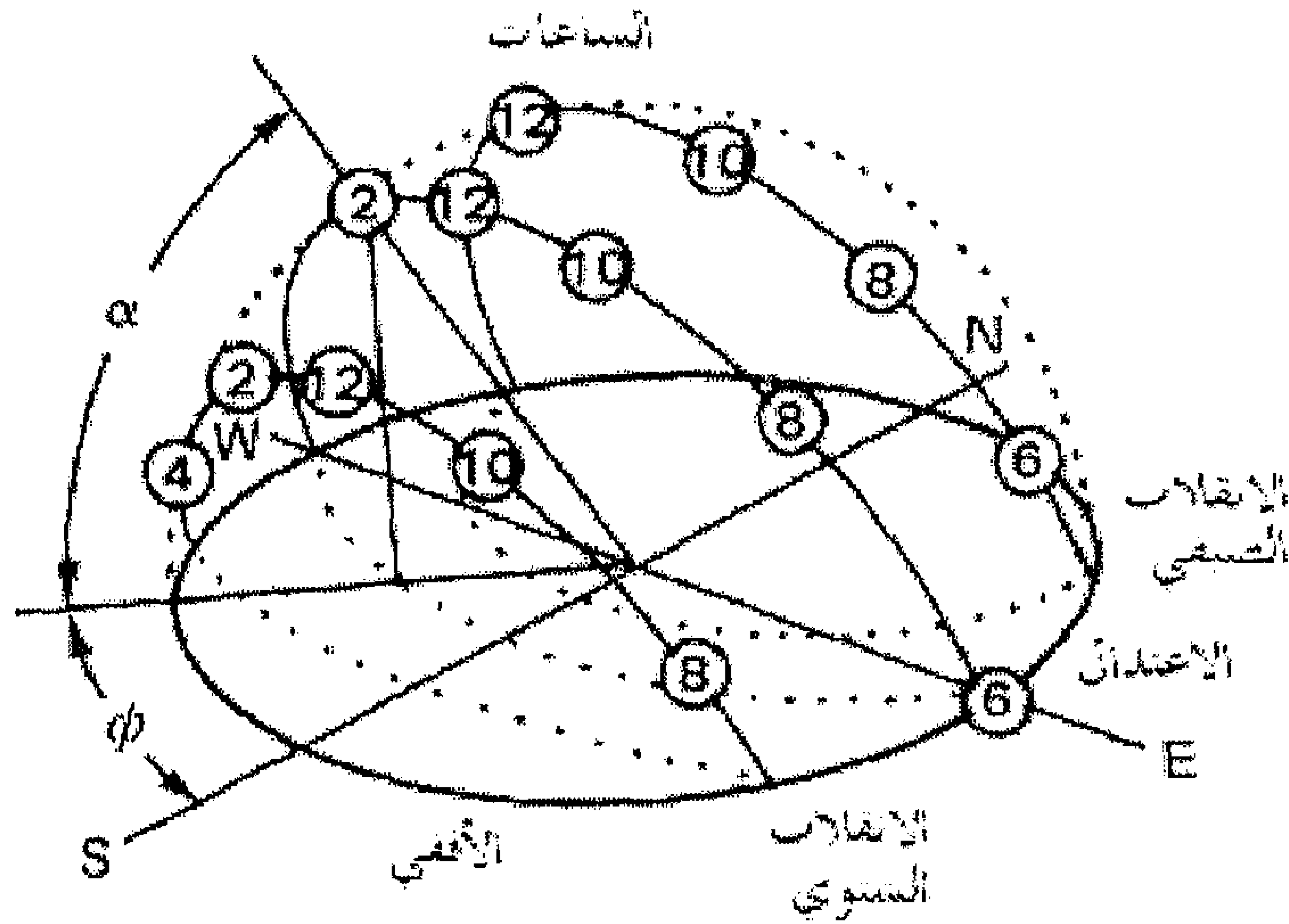
السرطان والجدي وخط الاستواء بالنسبة للشمس للفصول الأربعة. عند الانقلاب الشتوي (عند 21 ديسمبر)، يميل القطب الشمالي بزاوية °23.45 بعيداً عن الشمس،



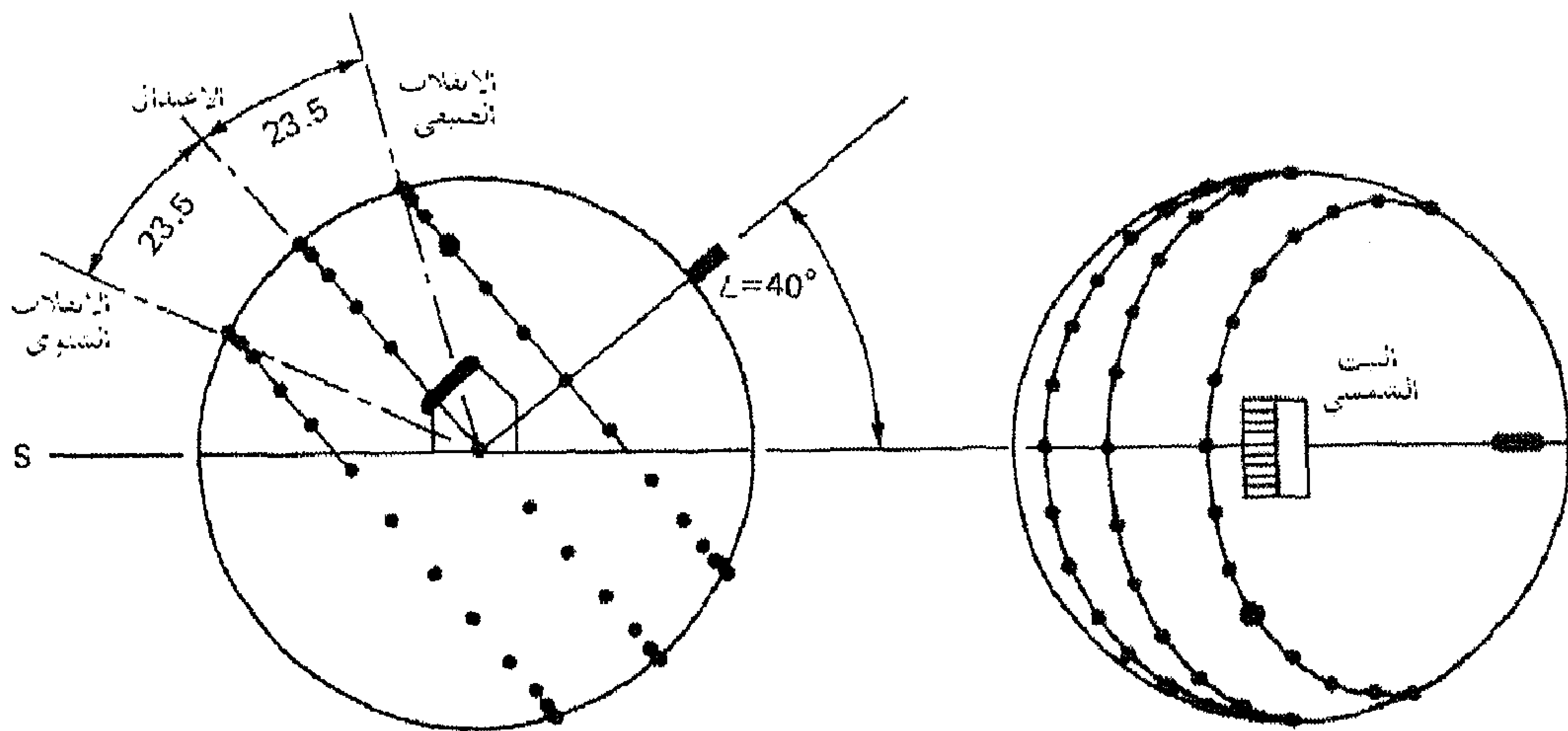


شكل (1.2) أ ـ مخطط الموضع النسبي للشمس والأرض في أوقات مختلفة من السنة؛ ب ـ مخطط لمواضع الدوائر القطبية الشمالية والجنوبية وخطي السرطان والجدي وخط الاستواء بالنسبة للشمس للفصول الأربعة

ولهذا كل الأماكن في الجزء الشمالي للدائرة القطبية الشمالية تكـون مظلمـة تمامـاً، بينما يكون الجزء الجنوبي مـن الـدائرة القطبيـة الجنوبيـة مشمسـاً دائمـاً. في فصـل الصيف (21 يونيو) يكـون العكس صحيحاً. عنـد الاعتدالين الربيـعـي والخـريفي



(أ)



(ب)

شكل (2.2) مسارات الشمس لمواسم الانقلاب الصيفي (6/21)، الاعتدالين (3/21 و 9/21)، والانقلاب الشتوي (12/21) لخط عرض 40°: (أ) منظر قياسي، (ب) المنظر العلوي والجانبي

(21 مارس و 21 سبتمبر، على التوالي)، فان القطبين الشمالي والجنوبي يكونا على مسافة واحدة من الشمس، ولهذا يكون طول النهار على كل الأرض 12 ساعة نهاراً و 12 ساعة ليلاً، وعندها فقط تشرق الشمس من جهة الشرق وتغرب في جهة الغرب تماماً. الشكل (2.2) يمثل مسقط مسار الشمس على الأرض لمواسم الانقلاب الصيفي (21/ 6)، الاعتدالين (21/ 3 و 21/ 9)، و الانقلاب الشتوي (21/ 12) لخط عرض 40°.

مما سبق يتبين أن شدة الإشعاع الشمسي تكون دالة في موضع الشمس والتي يمكن أن يعبر عنها بدلالة الزوايا الشمسية.

4.2 الزوايا الشمسية

تعتمد شدة الشعاع الشمسي الساقط على سطح الأرض على طول مسار الأشعة الشمسية في الجو، والذي يعتمد بدوره على زوايا الأشعة الشمسية. طول المسار يؤثر في الأشعة الشمسية وذلك نتيجة لظاهرتي الامتصاص والتشتت للأشعة خلال مسارها في الجو. بالإشارة إلى الشكل (3.2) هذه الزوايا يمكن تعريفها كالتالي:

δ : زاوية ميلان الشمس، وهي الزاوية المحصورة بين الخط الممدود من مركز الشمس إلى مركز الأرض وخط الاستواء للكرة الأرضية، $-23.45^{\circ} \le \delta \le 23.45^{\circ}$، تكون موجبة في جهة الشمال.

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(284+n)\right] \qquad (1.2)$$

حيث n يمثل رقم اليوم في السنة من 1 يناير.

L : زاوية خط العرض، وهي الزاوية المحصورة بين الخط الواصل بين نقطة ما على سطح الأرض و مستوى خط الاستواء.

s : زاوية ميل السطح، وهي الزاوية بين السطح والمستوى الأفقي.

ψ : زاوية اتجاه السطح، وهي الزاوية المحصورة بين مسقط الخط العمودي على السطح على المستوى الأفقي و اتجاه الجنوب، وتكون الزاوية موجبة في اتجاه الغرب وسالبة في اتجاه الشرق ومساوية صفراً في اتجاه الجنوب.

h : زاوية الساعة، هي الزاوية المحصورة بين مسقط الشعاع الشمسي عند زمن معين والزوال الشمسي أي الساعة 12:00. كل ساعة من الزوال تساوي 15° وتكون الإشارة موجبة بعد الزوال أو مساءاً وسالبة قبل الزوال أو صباحاً.

$$h = \pm\frac{1}{4}\times(\text{مجموع الدقائق عن الزوال الشمسي}) \tag{2.2}$$

z : زاوية السمت، وهي الزاوية بين الشعاع الشمسي والمحور العمودي على الأرض.

$$z = \cos^{-1}[\sin L \sin\delta + \cos L \cos\delta \cos h] \tag{3.2}$$

α : زاوية ارتفاع الشمس، الزاوية المحصورة بين الشعاع الشمسي ومسقط الشعاع على المستوى الأفقي (المستوى الماس لسطح الأرض) وبهذا تكون $\alpha = 90^{\circ} - z$.

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin L \sin\delta + \cos L \cos\delta \cos h] \tag{4.2}$$

ϕ : زاوية اتجاه الشمس، وهي الزاوية المحصورة بين الجنوب والمسقط الأفقي للشعاع الشمسي، وتكون الزاوية موجبة في اتجاه الغرب وسالبة في اتجاه الشرق ومساوية صفراً في اتجاه الجنوب.

$$\phi = \sin^{-1}\left[\cos\delta \frac{\sin h}{\cos\alpha}\right] \tag{5.2}$$

i : زاوية سقوط الشعاع، وهـي الزاويـة المحصـورة بـين الشـعاع الشمسـي والعمودي على السطح.

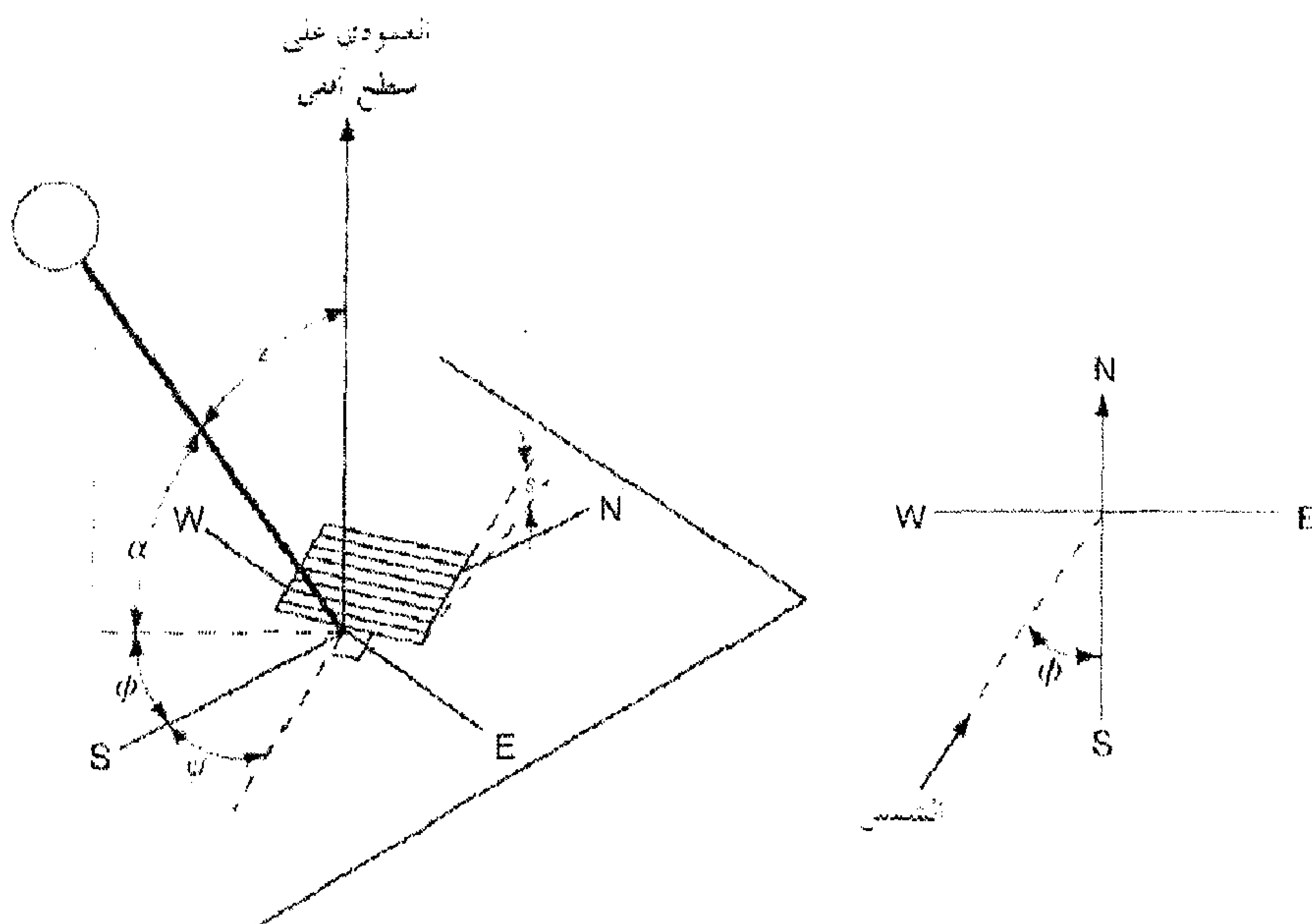
$$i = \cos^{-1}[\sin L \sin\delta \cos s - \cos L \sin\delta \sin s \cos\psi + \cos L \cos\delta \cosh \cos s + \sin L \cos\delta \cosh \sin s \cos\psi + \cos\delta \sinh \sin s \sin\psi] \quad (6.2)$$

ويستطيع القارئ اشتقاق حالات خاصة لزاوية السقوط من الصيغة العامـة، على سبيل المثال لسطح أفقي، سطح عمودي، سطح متجه جنوباً أو شمالاً.

β : زاوية الظل، وهي الزاوية المحصورة بين المحور العمـودي علـى السـطح ومسقط الشعاع الشمسي في المستوى العمودي على السطح. كمـا هـو مبين في الشكل (4.2).

$$\beta = \tan^{-1}\left[\frac{\tan\alpha}{\cos(\phi-\psi)}\right] \quad (7.2)$$

الشكل (3.2) يوضح تخطيطاً الزوايا الشمسية السالفة الذكر.



شكل (3.2) زاوية ميل السطح s، زاوية اتجاه السطح ψ، زاوية ارتفاع الشمس α، زاوية اتجاه الشمس ϕ، زاوية سمت الشمس z

غالباً ما يكون من الضروري حساب ساعات الشروق والغروب وطول النهار ليوم محدد. زاوية الساعة عند الغروب h_{ss}، يمكن الحصول عليها بحل المعادلة (4.2) لزاوية الساعة h، عند $\alpha = 0$، وبهذا تكون زاوية ساعة الغروب هي:

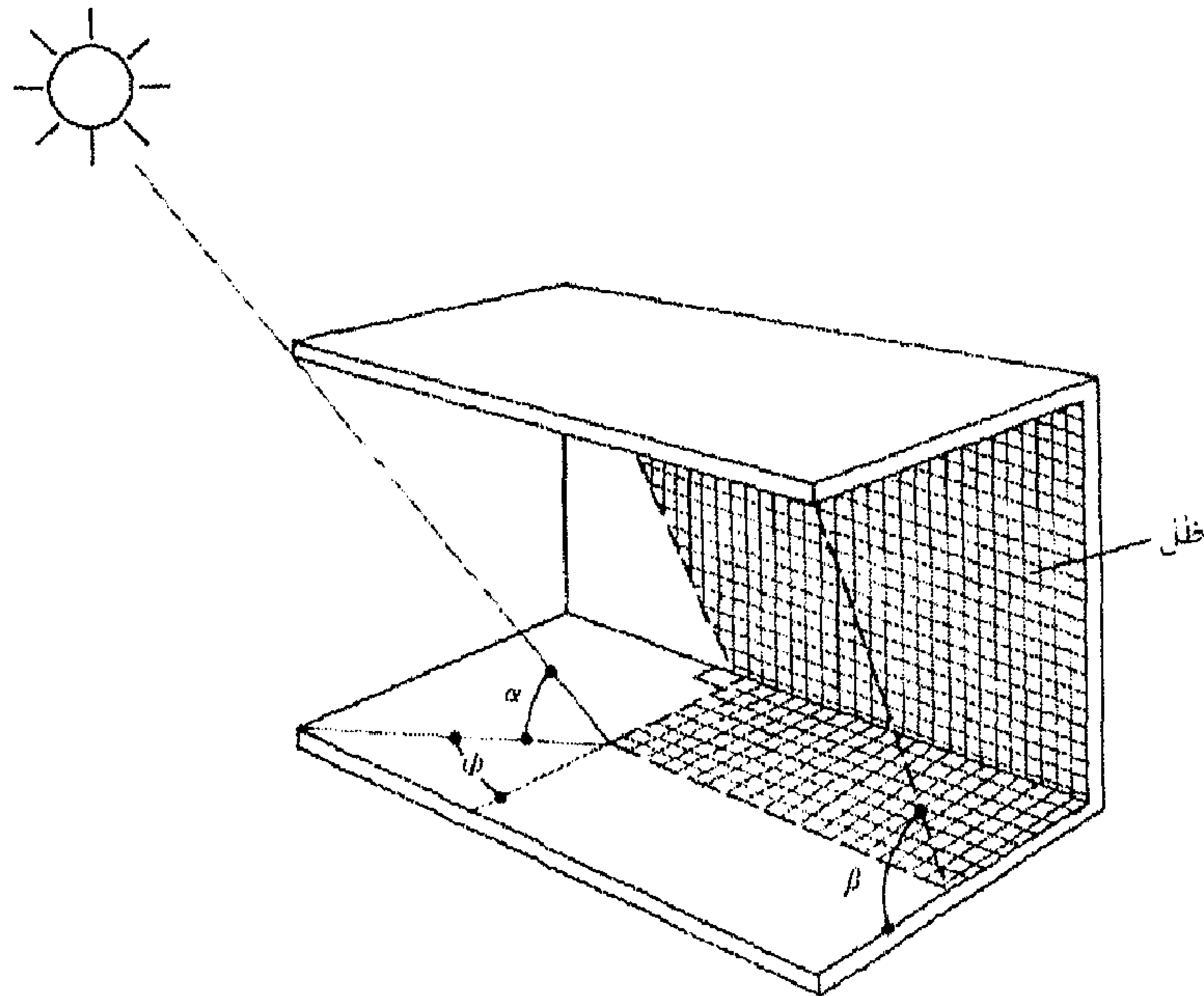
$$h_{ss} = \cos^{-1}[-\tan L \tan \delta] \tag{8.2}$$

حيث تكون زاوية الساعة موجبة عند الغروب. بما أن زاوية الساعة عند الزوال تكون صفراً، والساعة الواحدة تكافئ °15، بهذا يمكن أن نحسب وقت الشروق والغروب بالساعة من ساعة الزوال، على الصورة التالية:

$$\frac{1}{15}\cos^{-1}[-\tan L \tan \delta] \tag{9.2}$$

وطول اليوم بالساعات T_d يُعطى بالعلاقة التالية:

$$T_d = \frac{2}{15}\cos^{-1}[-\tan L \tan \delta] \tag{10.2}$$



شكل (4.2) زاوية الظل β، زاوية ارتفاع الشمس α، زاوية اتجاه الشمس ϕ

مثال 1.2

تقع مدينة بنغازي على الإحداثيات الأرضية 32°06′N/20°04E، احسب لأيام 21 من كل شهر التالي:

1. زاوية ميلان الشمس.
2. ساعة الغروب.
3. ساعة الشروق.
4. طول اليوم بالساعة.

الحل:

1. لحساب زاوية ميلان الشمس يجب معرفة n والذي يمثل رقم اليوم في السنة، فعلى سبيل المثال 21 يناير تكون $n = 21$، وللأشهر التالية تكون قيمة n هي مجموع أيام الأشهر التي قبل اليوم المعين مضافاً إلى المجموع 21، وبهذا تكون n ليوم 21 مايو على الصورة التالية: $n = 31 + 28 + 31 + 30 + 21 = 141$، ثم نستخدم المعادلة (1.2).
2. يجب تحويل نظام الدقائق إلى النظام العشري. أي أن كل 60 دقيقة تساوي 1.00، وبهذا تكون زاوية خط العرض لمدينة بنغازي 32.1 درجة.
3. لتعيين ساعة الغروب نستخدم المعادلة (8.2).
4. ساعة الشروق هي نفسها ساعة الغروب ولكنها تكون قبل الزوال.
5. يمكن حساب طول اليوم عن طريق المعادلة (8.2).

فإذا ما تم استخدام القيم الصحيحة في المعادلات السابقة الذكر فسوف تحصل على النتائج المبينة في الجدول التالي، جدول(1.2):

جدول (1.2) يمثل زاوية ميلان الشمس على مدار السنة

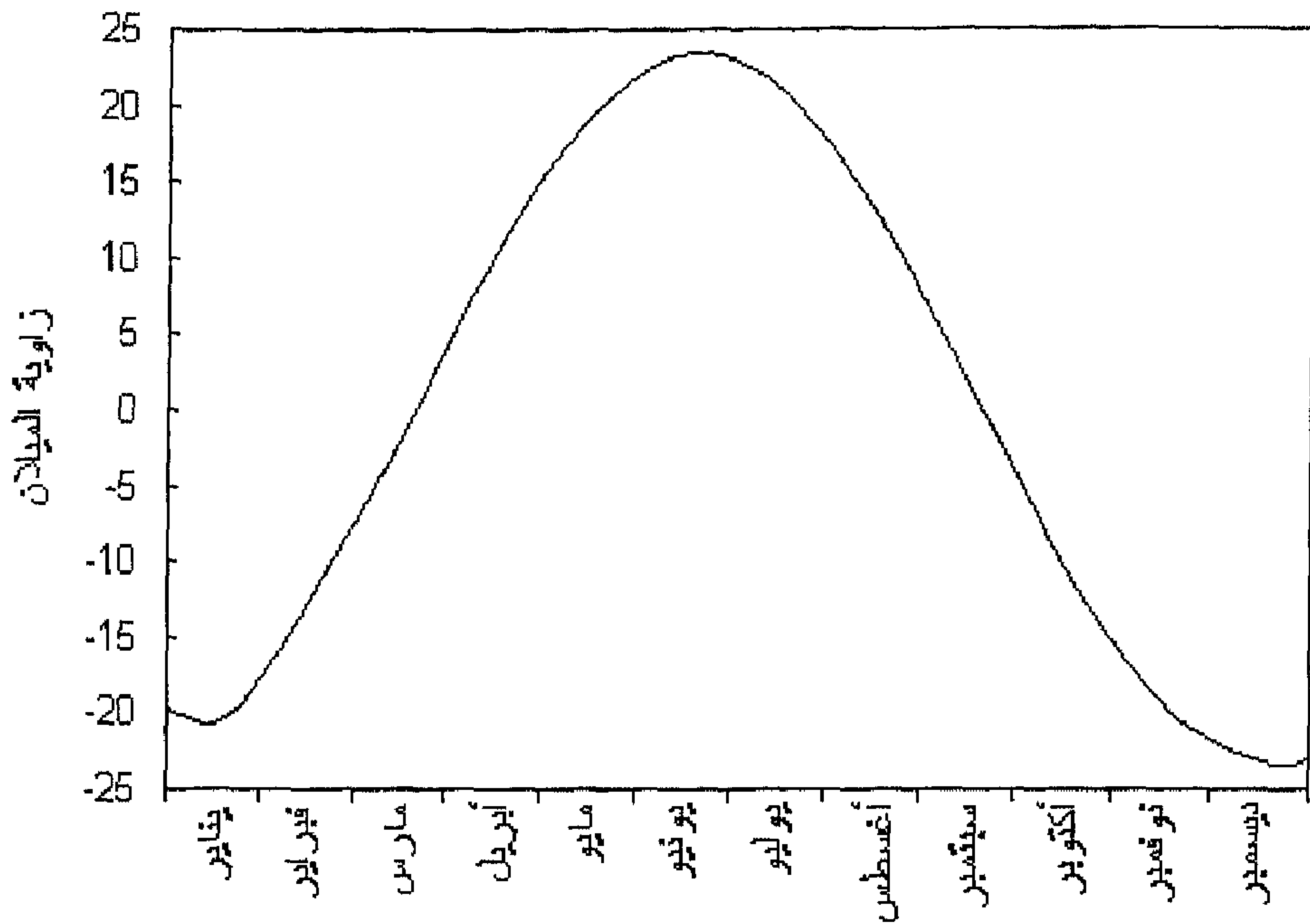
الشهر	n لليوم في الشهر	اليوم	n في السنة	δ زاوية ميلان الشمس	ساعة الشروق صباحاً	ساعة الغروب مساءاً	طول اليوم ساعة
يناير	i	21	21	-20.11	6:53	5:07	10:14
فبراير	$31+i$	21	52	-11.18	6:29	5:31	11:02
مارس	$59+i$	21	80	-0.34	6:01	5:59	11:58
أبريل	$90+i$	21	111	11.63	5:31	6:29	12:58
مايو	$120+i$	21	141	20.17	5:07	6:53	13:46
يونيو	$151+i$	21	172	23.45	4:57	7:03	14:06
يوليو	$181+i$	21	202	20.40	5:06	6:54	13:48
أغسطس	$212+i$	21	233	11.68	5:31	6:29	12:58
سبتمبر	$243+i$	21	264	-0.29	6:01	5:59	11:58
أكتوبر	$273+i$	21	294	-11.84	6:31	5:29	10:58
نوفمبر	$304+i$	21	325	-20.49	6:55	5:05	10:10
ديسمبر	$334+i$	21	355	-23.45	7:03	4:06	9:52

ملاحظات:

1. في حالة استعمال أجهزة الحاسوب لتعيين هذه الزوايا، على سبيل المثال برنامج Excel أو أي برنامج أخر، فعلى القارئ أن يدرك أن الحاسوب يتعامل مع النظام الدائري وليس نظام الدرجات للزوايا.
2. النتائج المتحصل عليها لزوايا الساعة هي بالنظام العشري وليست بنظام الدقائق، ولهذا وجب تحويلها، فمثلا كانت زاوية الساعة 7.79 بالنظام العشري تكافئ 7:47 بنظام الدقائق. وذلك بضرب الكسر المئوي في 100/ 60 ثم إضافة الناتج للعدد الصحيح الذي يمثل الساعة. كما في المثال الموضح:

$$7.79 \Rightarrow 0.79 * 60/100 + 7 \Rightarrow 7:47$$

3. ساعات الشروق والغروب المتحصل عليها لا تعتبر هي الساعات الحقيقية للمكان المحدد، وإنما هي ساعات شمسية ويجب تحويلها إلى التوقيت الأرضي.



شكل (5.2) زوايا ميلان الشمس ليوم 21 من كل شهر

5.2 حساب الزمن

في حسابات الطاقة الشمسية، يستخدم التوقيت الشمسي لصياغة زمن اليوم. أساس التوقيت الشمسي هو الحركة الزاوية الظاهرة للشمس في السماء، وهو يمثل الزمن التي تقطع فيه الشمس نصف النهار ويعرف بالزوال الشمسي المحلي. وغالباً لا يمثل هذا الزمن التوقيت المحلي للموقع. في العديد من التطبيقات الشمسية يكون من المهم أن نعرف بالضبط متى يحدث الزوال الشمسي حسب التوقيت المحلي في أي يوم. في التحليل السابق تم فرض أن، التوقيت الشمسي والتوقيت المحلي (المعدل لخط الطول) لهما نفس القيمة. في الحقيقة، التوقيتان يكونان مختلفين قليلاً ويُحسب الوقت بمعادلة الوقت EOT، وهي على الصورة التالية:

الوقت الحقيقي= الوقت القياسي المعدل + EOT (11.2)

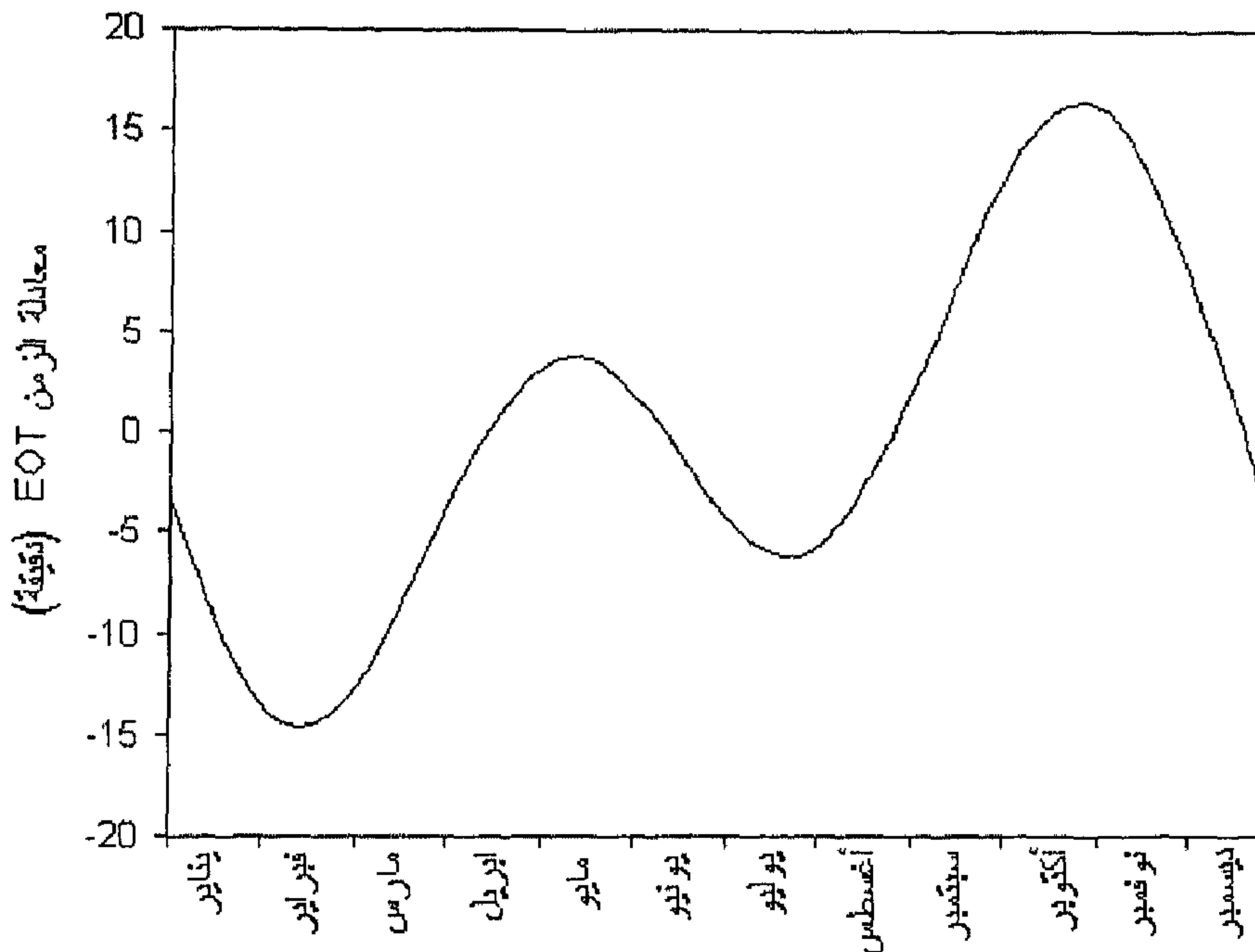
حيث EOT يمثل معادلة الزمن و:

الوقت القياسي المعدل = الوقت القياسي + 4 (دائرة خط طول الوقت القياسي - خط الطول الموقع المحدد) (12.2)

سبب اختلاف معادلة الزمن هو اختلاف محور مدار ودوران الأرض. هذه التأثيرات تسبب اختلافاً بسيطاً في الوقت الذي تقطع فيه الشمس نصف السماء عند الزوال الشمسي الحقيقي. الجدول (2.2) يقدم عرضاً لمعادلة الزمن والشكل (6.2) يوضح التغيير في EOT خلال أيام السنة. وقيم معادلة الزمن بالدقائق يمكن الحصول عليها أيضاً عن طريق المعادلة التجريبية التالية:

$$EOT = 9.87\sin 2B - 7.53\cos B - 1.5\sin B \qquad (13.2)$$

حيث: $B = \frac{360}{365}(n-81)$ و n رقم اليوم في السنة $1 \le n \le 365$.



شكل (6.2) معادلة الزمن EOT بالدقائق كدالة في أيام السنة

جدول (2.2) قيم معادلة الزمن بالدقائق والثواني لبعض أيام السنة

التاريخ		معادلة الزمن		التاريخ		معادلة الزمن		التاريخ		معادلة الزمن	
		دقيقة	ثانية			دقيقة	ثانية			دقيقة	ثانية
يناير	1	-3	14	فبراير	1	-13	34	مارس	1	-12	38
	5	-5	06		5	-14	02		5	-11	48
	9	-6	50		9	-14	17		9	-10	51
	13	-8	27		13	-14	20		13	-09	49
	17	-9	54		17	-14	10		17	-08	42
	21	-11	10		21	-13	50		21	-07	32
	25	-12	14		25	-13	19		25	-06	20
	29	-13	05						29	-05	07
ابريل	1	-04	12	مايو	1	+02	50	يونيو	1	+02	27
	5	-03	01		5	+03	17		5	+01	49
	9	-01	52		9	+03	35		9	+01	06
	13	-00	47		13	+03	44		13	+00	18
	17	+00	13		17	+03	44		17	-00	33
	21	+01	06		21	+03	34		21	-01	25
	25	+01	53		25	+03	16		25	-02	17
	29	+02	33		29	+02	51		29	-03	07
يوليو	1	-03	31	اغسطس	1	-06	17	سبتمبر	1	-00	15
	5	-04	16		5	-05	59		5	+01	02
	9	-04	56		9	-05	33		9	+02	22
	13	-05	30		13	-04	57		13	+03	45
	17	-05	57		17	-04	12		17	+05	10
	21	-06	15		21	-03	19		21	+06	35
	25	-06	24		25	-02	18		25	+08	00
	29	-06	23		29	-01	10		29	+09	22
أكتوبر	1	+10	01	نوفمبر	1	+16	21	ديسمبر	1	+11	16
	5	+11	17		5	+16	23		5	+09	43
	9	+12	27		9	+16	12		9	+08	01
	13	+13	30		13	+15	47		13	+06	12
	17	+14	25		17	+15	10		17	+04	17
	21	+15	10		21	+14	18		21	+02	19
	25	+15	46		25	+13	15		25	+00	20
	29	+16	10		29	+11	59		29	-01	39

دوائر خط الطول للوقت القياسي الخمسة للاستخدام في المعادلة (12.2) في الولايات المتحدة هي: منطقة الألسكا °150–، منطقة المحيط الهادي °120–، المنطقة الجبلية °105–، المنطقة الوسطى °90–، والمنطقة الغربية °75–، (Hsieh, 1981).

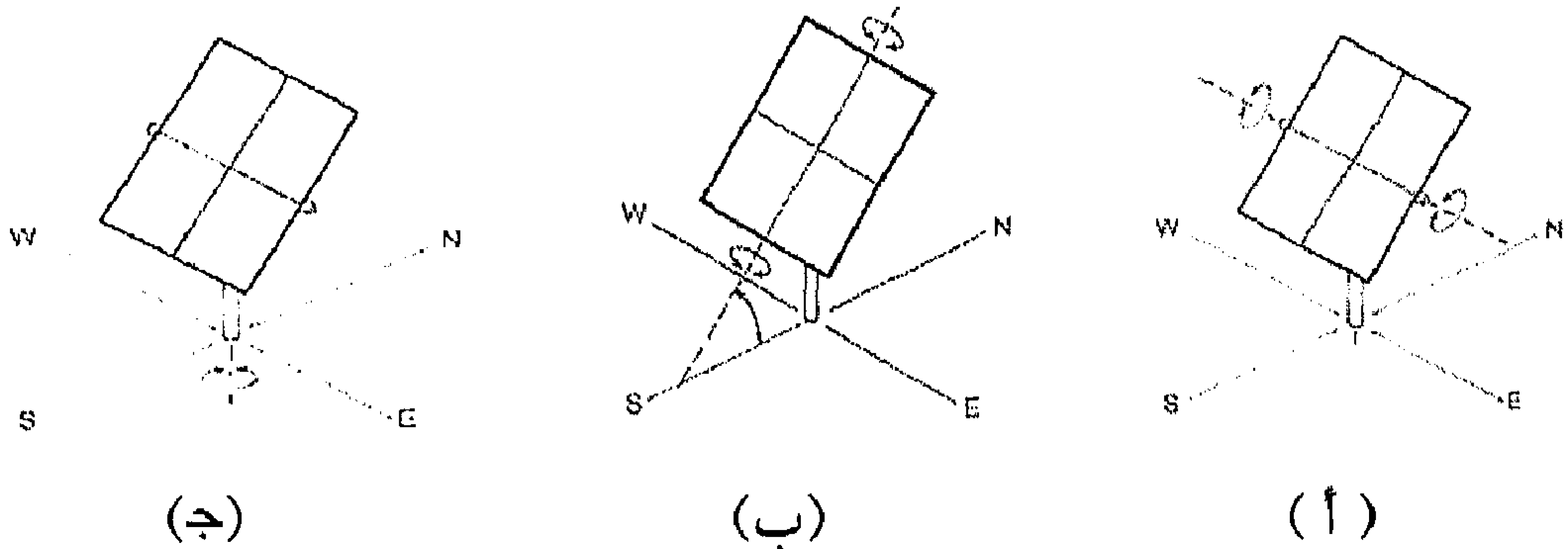
6.2 أنظمة تتبع حركة الشمس الظاهرية

تتبع المنظومات الشمسية حركة الشمس الظاهرية عن طريق تحريك اللواقط الشمسية في زوايا محددة لتقليل زاوية سقوط الأشعة الشمسية على أسطحها وبهذا تزيد من الأشعة الساقطة المباشرة. العلاقات الرياضية في هذا الجزء ستكون مفيدة لحسابات الإشعاع الشمسي الساقط على الأسطح المتحركة. بالإضافة إلى أن بعض المجمعات الشمسية تتحرك باستمرار والبعض الأخر يتحرك من فترة إلى أخرى، فان معادلات زاوية السقوط لمعظم حالات التتبع مدرجة أدناه. لأي معلومات إضافية حول هذا الموضوع أنظر (Braun, Mitchell, 1983).

1.6.2 الدوران حول محور الشرق ـ الغرب

في حالة تتبع المجمع لحركة الشمس باستمرار، يقوم المجمع بالدوران حول محور الشرق - الغرب في اتجاه الشمال - الجنوب، كما هو مبين في الشكل (7.2-أ). وبذلك فإن زاوية السقوط الصغرى تكون على الصورة التالية:

$$i = \cos^{-1}\left[1-\cos^2\delta\sin^2 h\right]^{1/2} \qquad (14.2)$$



شكل (7.2) نموذج لمجمعات شمسية تتتبع حركة الشمس الظاهرية

2.6.2 الدوران حول محور الشمال ـ الجنوب

في هذه الحالة يدور المجمع الشمسي حول محور الشمال – الجنوب في اتجاه الشرق – الغرب. وسيتطلب ذلك دوران بزاوية أكبر من حركة زاوية صغيرة كل يوم لتتبع حركة الشمس من الشروق إلى الغروب، كما هو مبين في الشكل (7.2– ب). لمثل هذه المجمعات فان زاوية السقوط الصغرى تكون:

$$i = \cos^{-1}\left[(\sin L \sin\delta + \cos L \cos\delta \cosh)^2 + \cos^2\delta \sin^2 h\right]^{1/2} \quad (15.2)$$

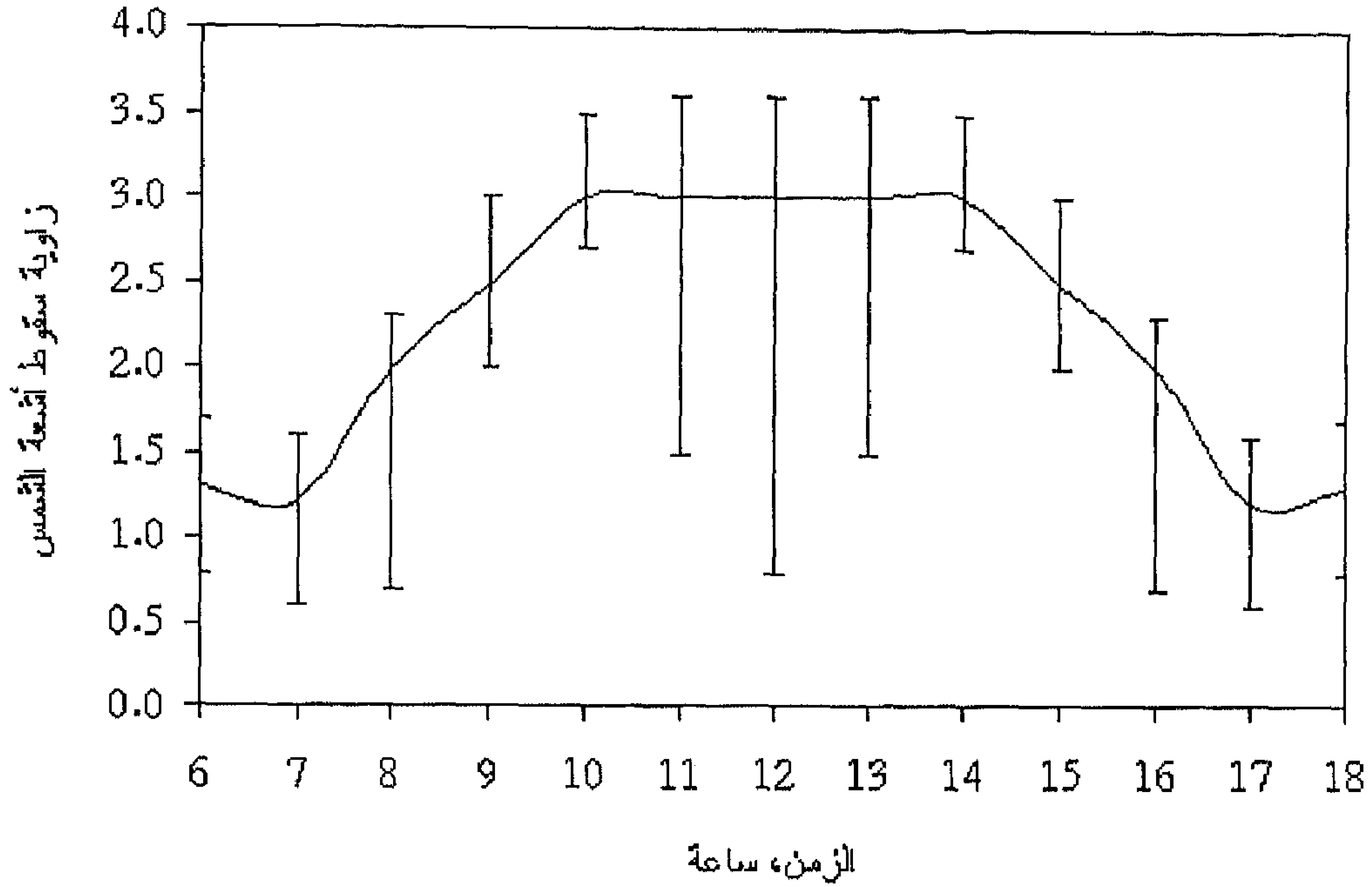
3.6.2 الدوران حول المحور العمودي على المستوى الأفقي

لزيادة استقبال من الطاقة الشمسية فان المحور المفضل للحركة هو الدوران حول المحور العمودي على المستوى الأفقي، وتكون زاوية ميل المجمع مساوية لزاوية خط عرض الموقع، كما هو مبين في الشكل (7.2– ج). في هذه الحالة تكون زاوية السقوط تعتمد فقط على زاوية الميلان:

$$i = \delta \quad (16.2)$$

4.6.2 الدوران حول محورين متعامدين

في حالة تحرك المجمع الشمسي حول محورين وبحرية، فيمكن أن تكون زاوية السقوط في مثل هذه المنظومات مساوية للصفر خلال اليوم، وبهذا نحصل على أعلى قيمة للإشعاع الشمسي الساقط على السطح، وباستخدام هذا النوع من منظومات التتبع يمكن تحقيق زيادة في نسبة الطاقة الشمسية الساقطة على السطح تصل إلى تقريباً 38% أعلى من النظام الثابت. يبين الشكل (8.2) نجوع هذه المنظومة في التقليل من زاوية السقوط إلى الحد الأدنى لها على مدار السنة، (نصّار، 2003).



شكل (8.2) قيم زاوية سقوط أشعة الشمس لمنظومة تتبع الشمس على محورين وأقصى وأدنى انحراف للزاوية على مدار السنة

7.2 تقدير شدة الإشعاع الشمسي

1.7.2 الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي الأرضي

معدل الطاقة الشمسية الساقطة على وحدة المساحة في الفضاء عند منتصف المسافة بين الأرض والشمس يسمى بثابت الشمس H_{sc} ويساوي $1353\, W/m^2$ أو $4871\, kJ/hr.m^2$ وبما أن المسافة بين الأرض والشمس غير ثابتة، فإن ذلك يؤدي إلى تغير فيض الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي الأرضي بنسبة $\pm 5\%$. كما يمكن تصنيف الطيف الشمسي كالتالي: تقريباً 9% من الأشعة في الطيف الفوق بنفسيجي ($\lambda < 0.3\, \mu m$)، 45% في الطيف المنظور ($0.35 < \lambda < 0.75\, \mu m$)، و 46% في مدى الموجات التحت حمراء ($\lambda > 0.75\, \mu m$). يبين الشكل أيضاً أن أعلى شدة

للإشـعاع الشمسـي واقعـة في مـدى الطيـف المنظـور أي عنـد ($\lambda = 0.474\ \mu m$).
ودرجة حرارة هذه النقطة يمكن حسابها من قانون ليـون وتكـون تقريبـاً $6100\ K$، وتسمى درجة الحرارة هذه بدرجة حـرارة لـون الشـمس. درجـة حـرارة الشـمس الفعالة ـ بفرض أن سطحها جسم أسود ـ يمكن حسابها من قانون ستيفن بولتزمان كالتالي:

$$\sigma T_{s,e}^{4} A_s = H_{sc} A_m \qquad (17.2)$$

حيث A_s، مساحة سطح الشمس، H_{sc}، ثابت الشمس، A_m، مساحة كـرة نصـف قطرها يمثل منتصف المسافة بين الشـمس والأرض، σ، ثابـت بولتزمـان ويسـاوي $5.67\times10^{8}\ W/m^{2}.K^{4}$. باستخدام المعادلة السابقة تكـون درجـة حـرارة الشـمس الفعالة $T_{s,e} = 5763.7\ K$.

التشعيع الشمسي H يمكن تعريفه بأنه الإشـعاع الشمسـي اللحظـي المسـتقبل بواسطة وحدة المساحة لوحدة الزمن. لسطح عمودي على الأشعة الشمسية ومتجه نحوها، فان قيمة الإشعاع الشمسي الخارجي العمودي H_{on} تعطى بالعلاقة التالية:

$$H_{on} = H_{sc}\left(1 + 0.033\cos\frac{360n}{365}\right) \qquad (18.2)$$

حيث n، رقم اليوم في السنة. وبذلك يصـبح الإشـعاع الشمسـي الخـارجي علـى المستوى الأفقي H_{oH}:

$$H_{oH} = H_{on}\cos z$$

$$H_{oH} = H_{sc}\left(1 + 0.033\cos\frac{360n}{365}\right)\cos z \qquad (19.2)$$

حيث z، زاوية سمت الشمس.

الإشعاع الشمسي الساعتي المستقبل من قبل سطح أفقي I_o، يعطى بالعلاقة:

$$I_o = \int_{t_1}^{t_2} H_{sc}\left(1 + 0.033\cos\frac{360\,n}{365}\right)\cos z\; dt \qquad (20.2)$$

حيث t_2, t_1، زمن بداية ونهاية فترة الساعة. وبدلالة زاوية الساعة المناظرة للزمن h_2, h_1، وبالتعويض عن قيمة $\cos z$ من المعادلة (3.2)، يمكن إعادة صياغة I_o كالتالي:

$$I_o = \frac{180 \times 3600}{\pi \times 15}\int_{h_1}^{h_2} H_{sc}\left(1 + 0.033\cos\frac{360n}{365}\right)(\sin L\sin\delta + \cos L\cos\delta\cos h)\; dh$$

وبإجراء التكامل نحصل على:

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} H_{sc}\left(1 + 0.033\cos\frac{360n}{365}\right)\left[\frac{\pi}{180}(h_2 - h_1)\sin L\sin\delta + \cos L\cos\delta(\sin h_2 - \sin h_1)\right] \qquad (21.2)$$

حيث h_2, h_1، تُعطى بالدرجات. وبهذا يكون الإشعاع الشمسي اليومي المستقبل على سطح أفقي H_o:

$$H_o = \int_{h_{sr}}^{h_{ss}} I_o\; dt$$

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} H_{sc}\left(1 + 0.033\cos\frac{360n}{365}\right)\left[\frac{\pi\, h_{ss}}{180}\sin L\sin\delta + \cos L\cos\delta\sin h_{ss}\right] \qquad (22.2)$$

حيث h_{ss}، زاوية ساعة الغروب بالدرجات.

مثال 2.2

احسب الإشعاع الشمسي الخارجي اليومي على سطح أفقي في مدينة بنغازي ليوم 21 يونيو.

الحل:

من المثال (1.2) ساعة الغروب 06:53 ساعة، وهي تعادل 6.89. يوم 21 يونيـو أي

$L = 32.1^\circ$ ، $n = 172$

$\delta = 23.45^\circ$ ، $h_{ss} = 15 \times 6.98 = 104.7^\circ$

باستخدام المعادلة (22.2)

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} H_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}\right) \left[\frac{\pi h_{ss}}{180} \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \sin h_{ss}\right]$$

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} 1353 \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360}{365} \times 172\right)\right] \left[\frac{\pi}{180} \times 104.7 \sin(32.1) \sin(23.45) + \cos(32.1) \cos(23.45) \sin(104.7)\right]$$

$$H_o = 2.6 \times 10^7 \left[0.3864 + 0.7517\right] = 29.6 \text{ MJ/m}^2$$ ◁

2.7.2 التوهين الجوي للإشعاع الشمسي

يصل الإشعاع الشمسي إلى سطح الأرض بعد فقدان جزئي لشدته عن طريـق الامتصاص والتشتّت في الجو. 2% من الأشعة الشمسية تقريباً تُمـتص في طبقـات الجو العليا وخاصة في طبقـة الأوزون وذلـك لأطـوال موجـات حتـى $0.29\ \mu m$، وجزء أخر من الإشـعاع يمـتص بواسـطة بخـار المـاء، وغـاز أول أكسـيد الكربـون وجزيئات الغبار، وذلك للموجات الطويلة بطول $2.5\ \mu m$. ولهذا فـان جـزء قليـل من الأشعة الشمسية يصـل إلى سـطح الأرض للموجـات بطـول $2.5 \div 0.29\ \mu m$. بالإضافة إلى ذلك، فان جزءاً من الطاقة الشمسية النافذة خلال طبقات الجو العليـا تتشتّت في كل الاتجاهات بواسطة جزيئات الهواء الجاف، بخار الماء، والغبار.

درجة توهين الإشعاع الشمسي خلال اجتيازه الغلاف الجوي الأرضي، تعتمد على طول مسار وخصائص الوسط المجتاز. ومن المألوف في حسابات الطاقة الشمسية استخدام مصطلح "كتلة الهواء" ويعرف، بأنه طول المسار (أو كتلة الهواء) المجتاز للوصول إلى سطح البحر عندما تكون الشمس عمودية. بتغير زاوية السمت للشمس عندما تتحرك في قوس السماء، فان كتلة الهواء m يُعبر عنها بدلالة زاوية السمت z بالمعادلة:

$$m=\frac{1}{\cos z} \qquad (23.2)$$

عند مستوى البحر وعندما تكون الشمس عمودية، تكون $z=0$ ، عندئذ تكون $m=1$ (كتلة الهواء 1). وعندما تكون $z=60^{\circ}$ ، عندها تكون $m=2$ (كتلة الهواء 2). وكتلة الهواء خارج الغلاف الجوي الأرضي في الفضاء تساوي صفراً.

3.7.2 حساب الإشعاع الشمسي الأرضي

أثناء مرور الشعاع الشمس خلال الغلاف الجوي الأرضي فانه يتشتّت، ينعكس، و يمتص، والذي تم شرحه في البند السابق. والإشعاع الشمسي المباشر يمكن تقديره من الإشعاع الشمسي الجوي وذلك بعد حساب التوهين الحاصل له. والعديد من المعادلات التجريبية لتقدير الإشعاع الشمسي الكلي (المباشر والمنتشر) على سطح الأرض موجودة في المراجع المتخصصة مثل: (Heywood, 1967, 1966) . (Duffie, Beckman, 1991), (Page, 1970)

بعض هذه المعادلات المستخدمة لتقدير متوسط الإشعاع الشمسي الكلي مبينة في الجدول (3.2 أ).

جدول (3.2 ـ أ) المعادلات التجريبية لتقدير الإشعاع الشمسي الكلي اليومي لمستوى أفقي

المرجع	المعادلة	رقم
(Masson, 1966)	$\overline{H} = 2.512 + 1.570\sqrt{T_s^2 + 5.281\,T_s}$	1
(Page, 1964)	$\overline{H} = \overline{H}_o\left(a + b\dfrac{T_s}{T_d}\right)$	2
(Swartman, 1966)	$\overline{H} = 20.51 \times \left(\dfrac{T_s}{12}\right)^{0.357} \times R^{-0.262}$	3
(Reddy, 1971)	$\overline{H} = K\,(1 + 0.8\,T_r)\,(1 - 0.2\,J)/R$	4
(Sabbagh, 1975)	$\overline{H} = 1.53 \times K \times \exp\left[\dfrac{\pi\,L}{180}\left(\dfrac{T_s}{12} - \dfrac{\sqrt[3]{R}}{100} - \dfrac{1}{T_{\max}}\right)\right]$	5

تعريف رموز المعادلات في الجدول (3.2 – أ) كالتالي:

a, b = ثوابت، وتعتمد قيمتهما على الموقع

$\overline{H}$ = المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي اليومي الكلي على سطح أفقي، MJ/m^2

$\overline{H}_o$ = المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي الجوي اليومي على سطح أفقي، MJ/m^2

J = نسبة الأيام المطرة إلى عدد أيام الشهر

K = $4.186\left[\left(\dfrac{0.2}{1 + 0.1\,L}\right)\left(\dfrac{T_s}{12}\right) + \psi_{i,j}\cos L\right]$، MJ/m^2

قيم $\psi_{i,j}$ معطاة في الجدول (3.2 – ب)

R = المتوسط الشهري للرطوبة النسبية اليومية

T_s = المتوسط الشهري لعدد ساعات السطوع اليومية

T_d = المتوسط الشهري لأقصى عدد ساعات السطوع اليومية

T_r = المتوسط الشهري لنسبة ساعات السطوع المحتملة اليومية

T_{max} = المتوسط الشهري لأقصى درجة حرارة الهواء اليومية، $^\circ C$

L = زاوية خط العرض، درجة

$\psi_{i,j}$ = معامل فصلي

i = 1 ,2 ,3 للمواقع الداخلية، الساحلية، والجبلية، على التوالي

j =1 ,2 ,3 ,... 12 من يناير حتى ديسمبر

قيم $\psi_{i,j}$ معطاة في الجدول (3.2 ب)

جدول (3.2 ـ ب) قيم معامل الموسم $\psi_{i,j}$

الموقع	ψ	أشهر السنة											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
داخلي	ψ_1	1.28	1.38	1.54	1.77	2.05	2.30	2.48	2.41	2.36	1.73	1.38	1.17
ساحلي	ψ_2	1.46	1.77	2.05	2.15	2.05	2.05	2.10	2.17	2.14	1.96	1.60	1.43
جبلي	ψ_3	1.60	1.81	2.00	2.17	2.25	2.26	2.24	2.20	2.10	1.92	1.74	1.60

وفي ما يلي بعض النماذج الرياضية للتنبؤ بمعدل الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي. وهذه النماذج هي، أولاً: نموذج السماء الصافية. ثانياً: نموذج السماء الغائمة.

8.2 نموذج السماء الصافية

1.8.2 نموذج آشراي (ASHRAE)ـ السماء الصافية

لتقدير الإشعاع الشمسي ليوم صافٍ على سطح الأرض توصي الجمعية الأمريكية لمهندسي التسخين، التبريد والتكييف آشراي (ASHRAE) باستخدام المعادلة التالية:

$$H_{bn} = A\,\mathrm{Exp}(-B/\cos z) = A\,\mathrm{Exp}(-B\,m) \qquad (24.2)$$

حيث: H_{bn} = حزمة الإشعاع الشمسي للسقوط العمودي، $\mathrm{W/m^2}$

A = الإشعاع الشمسي المرئي لكتلة الهواء صفر، $\mathrm{W/m^2}$

B = معامل الإطفاء الجوي

z = زاوية السمت

m = كتلة الهواء

بسبب تغير المسافة بين الأرض والشمس وتباين معدلات بخار الماء التي يحتويها الجو خلال الفصول، فان قيم A ، B تتغير على مدر السنة، وهذه القيم معطاة في الجدول (4.2) لأيام 21 من كل شهر. هذه القيم تمثل متوسط الشروط للأيام الصحوة للنصف الشمالي للكرة الأرضية $0 \le L \le 64°$.

ويمكن تمثيل الجدول (4.2) على صورة معادلات بدلالة n وبنسبة عالية من الدقة لطول أيام السنة، كالتالي:

$$A = -2\times10^{-7}n^4 + 2\times10^{-4}n^3 - 0.0337n^2 + 1.3389n + 1215.4 \qquad (25.2)$$

$$B = 1\times10^{-10}n^4 - 9\times10^{-8}n^3 + 2\times10^{-5}n^2 - 1\times10^{-3}n + 0.1547 \qquad (26.2)$$

$$C = 2\times10^{-10}n^4 - 1\times10^{-7}n^3 + 3\times10^{-5}n^2 - 1.5\times10^{-3}n + 0.0795 \qquad (27.2)$$

جدول (4.2) ثوابت معادلة آشراي لأيام 21 من كل شهر

التاريخ	A $\mathrm{W/m^2}$	B	C
21 يناير	1230	0.142	0.058
21 فبراير	1214	0.144	0.060
21 مارس	1185	0.156	0.071
21 أبريل	1135	0.180	0.097
21 مايو	1103	0.196	0.121

التاريخ	A W/m^2	B	C
21 يونيو	1088	0.205	0.134
21 يوليو	1085	0.207	0.136
21 أغسطس	1107	0.201	0.122
21 سبتمبر	1151	0.177	0.092
21 أكتوبر	1192	0.160	0.073
21 نوفمبر	1220	0.149	0.063
21 ديسمبر	1233	0.142	0.057

والإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي يُعطى بالعلاقة:

$$H_b = H_{bn} \cos z \qquad (28.2)$$

والإشعاع المنتشر من السماء الصافية والساقط على سطح أفقي:

$$H_d = C H_{bn} \qquad (29.2)$$

حيث H_d = الإشعاع المنتشر، W/m^2

C = ثابت معامل الإشعاع المنتشر وقيمته مدرجة في الجدول (4.2)

$$H = H_b + H_d \qquad (30.2)$$

2.8.2 نموذج هوتل (Hottel)

هناك نموذج آخر للسماء الصافية لتقدير الإشعاع المباشر النافذ خلال الجو الصحو. يُعرف بنموذج Hottel (Hottel,1976)، والذي قدم فيه معادلة يمكن استخدامها لارتفاعات أقل من 2.65 km فوق سطح البحر على الصورة التالية:

$$\frac{H_b}{H_{oH}} = [a_0 + a_1 \, \text{Exp}(-k/\cos z)] = \tau_b \qquad (31.2)$$

حيث τ_b، نفاذية الجو للحزمة الإشعاعية، z، زاوية السمت، H_b، الإشعاع المباشر الساقط على سطح أفقي، k, a_1, a_0 ثوابت تعتمد على طبيعة المناخ، وهي كالتالي:

لمدى الرؤية 25 km

$$\left.\begin{aligned} a_0^* &= 0.4237 - 0.00821(6-A)^2 \\ a_1^* &= 0.5055 + 0.00595(6.5-A)^2 \\ k^* &= 0.2711 + 0.01858(2.5-A)^2 \end{aligned}\right\} \quad (32.2)$$

لمدى الرؤية 5 km

$$\left.\begin{aligned} a_0^* &= 0.2538 - 0.0063(6-A)^2 \\ a_1^* &= 0.7678 + 0.0010(6.5-A)^2 \\ k^* &= 0.2490 + 0.0180(2.5-A)^2 \end{aligned}\right\} \quad (33.2)$$

حيث A الارتفاع عن سطح البحر بالكيلومتر وتطبق هذه المعادلات عند $A \leq 2.65$ km . صنف Hottel المناخ إلى 4 أصناف، والعلاقة بين k, a_1, a_0 و k^*, a_1^*, a_0^* مبينة في الجدول (5.2).

جدول (5.2) العلاقة بين الثوابت لأنواع المناخ المصنفة من قبل (Hottel, 1976)

نوع المناخ	a_0/a_0^* مدى الرؤية 25 km	a_0/a_0^* مدى الرؤية 5 km	a_1/a_1^*	k/k^*
مداري	0.95	0.92	0.98	1.02
صيف المناطق المتوسطة	0.95	0.96	0.99	1.02
صيف المناطق القطبية	0.99	0.98	0.99	1.01
شتاء المناطق المتوسطة	1.03	1.04	1.01	1.00

وبهذا يمكن صياغة معادلة عامة لتقدير الأشعة الشمسية على أساس الإشعاع الجوي ونفاذية الجو كالتالي:

$$X_{clear\ sky} = X_{on}\, \tau_b \quad (34.2)$$

حيث $X_{clear\ sky}$ ، تمثل قيمة الإشعاع الشمسي المقدرة بطريقة السماء الصافية، والتي يمكن أن تكون: H_{nb}، الإشعاع العمودي أو H_b ، الإشعاع الأفقي أو I_b ، الإشعاع الأفقي الساعتي. بينما X_{on} ، تمثل قيمة الإشعاع الشمسي المقدرة بطريقة السماء الصافية، والتي يمكن أن تكون: H_{on} ، الإشعاع الجوي اللحظي أو I_{on} ، الإشعاع الجوي الساعتي.

مثال 3.2

احسب شدة الإشعاع الشمسي المباشر الساقط على سطح أفقي في مدينة براك – ليبيا ($14°20'E - 27°36'N$) عند الساعة 1:30 بعد الزوال الشمسي ليوم 21 يونيو، وذلك باستخدام:

(أ) نموذج آشراي ASHRAE للسماء الصافية.

(ب) نموذج هوتل Hottel للسماء الصافية.

الحل:

$$L = 27°36' = 27.60° \quad , \quad n = 172$$

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365} \times (n + 284)\right] = 23.45°$$

عند الساعة 1:30 بعد الزوال، فإن زاوية الساعة تكون:

$$h = 15 \times (13.50 - 12.00) = 22.50°$$

زاوية سمت الشمس Z :

$$Z = cos^{-1}(sin L sin \delta + cos L cos \delta cos h) = 20.69°$$

من الجدول (4.2) قيم الثوابت B, A ليوم 21 يونيو هي:

$$A = 1088\ W/m^2 \quad , \quad B = 0.205$$

باستخدام المعادلتين (24.2) ، (28.2):

$$H_b = A \exp(-B/\cos Z)\times \cos Z$$
$$= 1088 \exp(-0.205/\cos 20.68)\times \cos 20.68 = 818\ W/m^2$$

والآن باستخدام نموذج هوتل، وبفرض أن مدينة براك تقع على مستوى سطح البحر، وهذا يعني أن $A = 0$ ، وبذلك تكون:

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821\,(6)^2 = 0.12814$$
$$a_1^* = 0.5055 + 0.00595\,(6.5)^2 = 0.75689$$
$$k^* = 0.2711 + 0.01858\,(2.5)^2 = 0.38723$$

ومن الجدول (5.2) للمناخ المداري فإن:

$$a_0 = 0.95\times 0.12814 = 0.1217$$
$$a_1 = 0.98\times 0.75689 = 0.74175$$
$$k = 1.02\times 0.38723 = 0.39497$$

وباستخدام المعادلة (31.2)، نحصل على:

$$\frac{H_b}{H_{oH}} = [a_0 + a_1 \exp(-k/\cos z)]$$

$$\frac{H_b}{H_{oH}} = [0.1217 + 0.74175 \exp(-0.39497/\cos 20.68)] = 0.6081$$

التشعيع الأرضي على سطح أفقي يُحسب من المعادلة (19.2) كالتالي:

$$H_{oH} = H_{sc}\left(1 + 0.033\cos\frac{360\,n}{365}\right)\cos z$$

$$H_{oH} = 1353\times\left(1 + 0.033\cos\frac{360\times 172}{365}\right)\times \cos 20.68 = 1225\ W/m^2$$

وبهذا فإن الشعاع الشمسي المباشر يكون:

$$H_b = 1225\times 0.6081 = 745\ W/m^2$$ ◁

9.2 نماذج تعتمد على القياسات الشمسية المحلية

في الجزء السابق، لا تعتمد النماذج المعطاة لتقدير شدة الإشعاع الشمسي على الموقع. بينما أثبتت التجارب أن هذه النماذج بعيدة بعض الشيء عن القياسات الحقيقية في الموقع تحت الدراسة.

ولهذا السبب طورت نماذج للتنبؤ بالإشعاع الشمسي، الساعتي، اليومي والمتوسط الشهري (الكلي، المباشر والمنتشر) على سطح أفقي في موقع محدد بالاعتماد على عدد صغير من القياسات الشمسية المأخوذة في الموقع. بعض هذه النماذج مدرجة في هذا الجزء.

1.9.2 نماذج لتقدير الإشعاع الشمسي الساعتي

(أ) باستخدام القياسات اليومية للاشعاع الشمسي

بين (Smietana et al., 1984) أن التشعيع الكلي يمكن تمثيله بواسطة منحنى جيب زاوية كالتالي:

$$H = H_{sn} \sin\left(\frac{\pi t'}{T_d}\right) \tag{35.2}$$

حيث: H_{sn}، التشعيع الكلي عند الزوال الشمسي، T_d ، طول اليوم (ساعة)، t'، الساعة بعد الشروق. بتكامل المعادلة السابقة على طول اليوم نحصل على:

$$H = \int_0^{T_d} H_{sn} \sin\left(\frac{\pi t'}{T_d}\right) dt' = \frac{2T_d}{\pi} H_{sn} \tag{36.2}$$

حيث H ، التشعيع الكلي اليومي. كذلك بالتكامل على مدة ساعة وبالتعويض $(t - t_{sr})$ بدلا من t' نحصل على:

$$I = \frac{I_d}{\pi} H_{sn} \left\{\cos\left[\frac{\pi(t_1 - t_{sr})}{T_d}\right] - \cos\left[\frac{\pi(t_2 - t_{sr})}{T_d}\right]\right\} \tag{37.2}$$

أو:

$$I = \frac{1}{2} H \left\{ \cos\left[\frac{180(t_1 - t_{sr})}{T_d}\right] - \cos\left[\frac{180(t_2 - t_{sr})}{T_d}\right] \right\} \quad (38.2)$$

حيث: t_2, t_1، بداية ونهاية التوقيت الشمسي لفترة ساعة واحدة، t_{sr}، ساعة شروق الشمس.

وقد طوّر كولاريس ورابل (Collares, Rabl,1979) طوروا العلاقة التجريبية التالية للتنبؤ بالإشعاع الشمسي الكلي الساعي، بدلالة الإشعاع الكلي اليومي:

$$\frac{I}{H} = \frac{\pi}{24}(a + b\cos h)\frac{\cos h - \cos h_{ss}}{\sin h_{ss} - \left(\frac{\pi h_{ss}}{180}\right)\cos h_{ss}} \quad (39.2)$$

حيث: h_{ss}، زاوية الغروب بالدرجات، h، زاوية الساعة بالدرجات وتكون في منتصف الساعة المحددة للحساب. تُحسب الثوابت b, a، تُحسب من المعادلات التالية:

$$a = 0.409 + 0.5016\sin(hss - 60) \quad (40.2)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767\sin(hss - 60) \quad (41.2)$$

وهناك علاقة تجريبية أخرى طورت أيضاً للتنبؤ بالإشعاع المنتشر الساعي بدلالة الإشعاع المنتشر اليومي:

$$\frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{24}\frac{\cos h - \cos h_{ss}}{\sin h_{ss} - \left(\frac{\pi h_{ss}}{180}\right)\cos h_{ss}} \quad (42.2)$$

الدراسات الإحصائية للتوزيع الزمني للإشعاع الشمسي الكلي على الأسطح الأفقية خلال اليوم، غالباً ما تعتمد على معلومات شهرية متوسطة لعدد من محطات الأرصاد الجوي، مما أدى إلى ظهور أشكال بيانية تمثل بيانات معدل الإشعاع

الساعي إلى الإشعاع اليومي، الكلي r_t، والمنتشر r_d، كدالة في طول اليوم وعند الساعة المطلوبة. من التعريف السابق يمكن الإشارة للمعدلين كالتالي:

$$r_t = \frac{I}{H} \quad (43.2)$$

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} \quad (44.2)$$

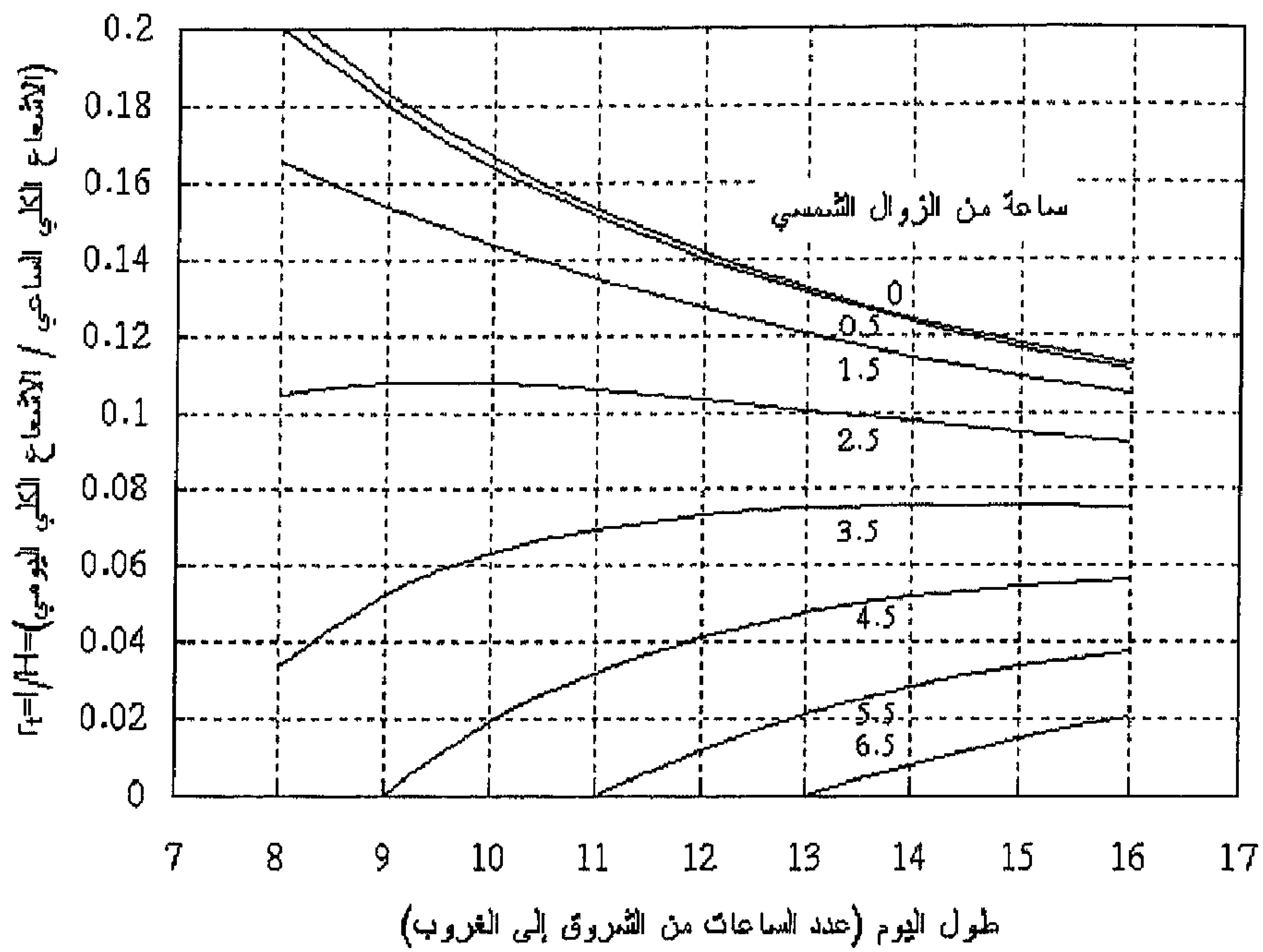
وبهذا يمكن الحصول على r_t و r_d من المعادلتين (36.2)، (39.2)، على التوالي.

الأشكال (9.2)، (10.2) ، تبين العلاقة بين الإشعاع الشمس الساعتي واليومي، الكلي والمنتشر على التوالي، وهي مبنية على أساس متوسطات لمعلومات مدد زمنية طويلة وتستخدم لحساب متوسط الإشعاع الشمسي الساعي، وينصح (Whillier,1956) باستخدام هذه المنحنيات لأيام منفردة. واستخدم العديد من الباحثين هذه المنحنيات لتمثيل البيانات الشمسية، حيث أشار كل من: (Iqbal,1979)، (Benseman, Cook,1969)، إلى أن هذه الأشكال تمثل المعلومات وبشكل مقبول.

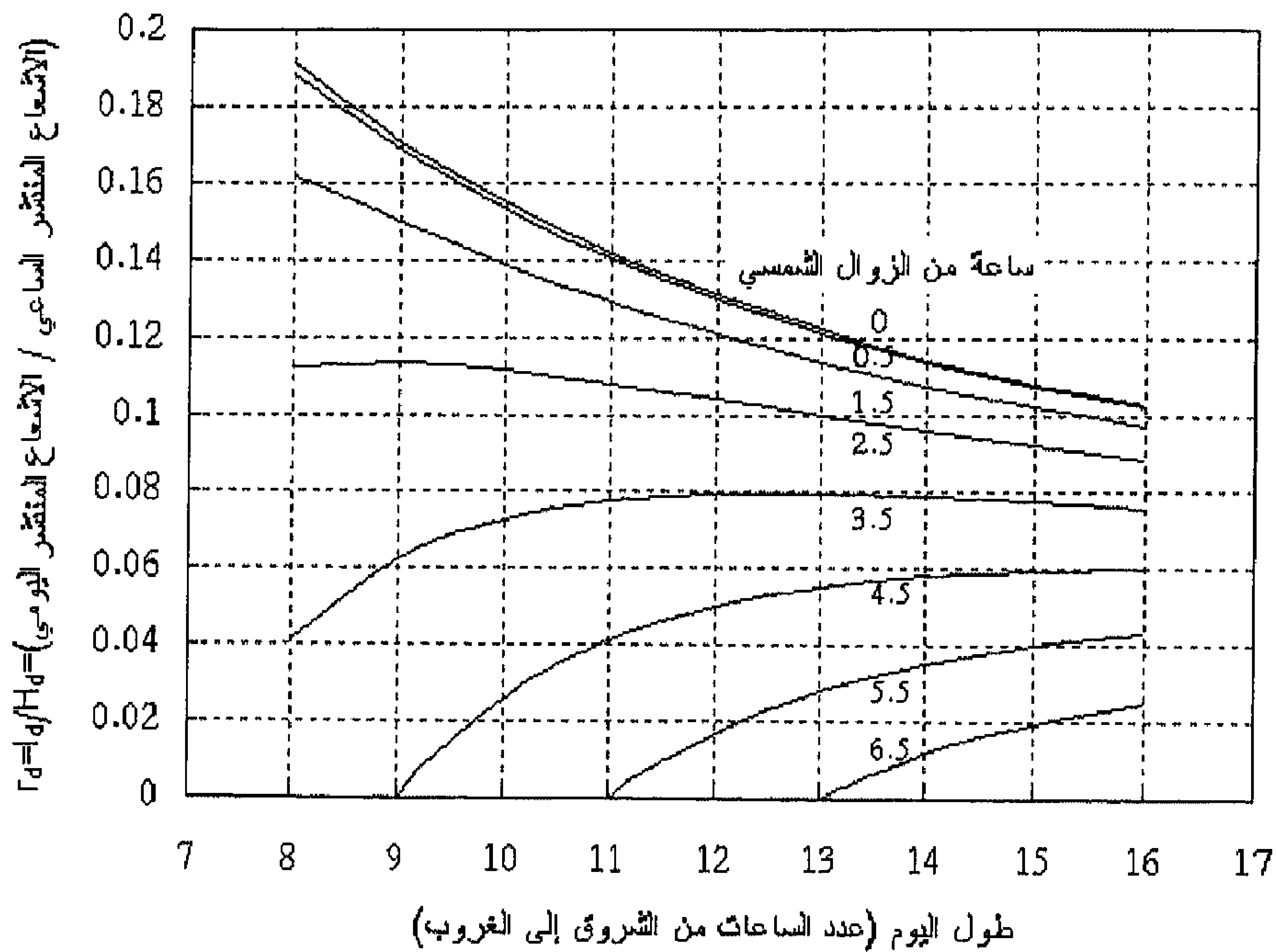
ولقد أشتقت صورة أكثر بساطة من تلك في المعادلة (36.2) بواسطة (Newell,1983)، والذي وجد أنه باستخدام المعادلة 43.3 لتقدير I/H ليوم بطول T_d ورسم العلاقة بين $(I/H)(T_d)$ و $(t-12)/(T_d/2)$، فان النتيجة تكون منحني يمكن تمثيله بمعادلة على الصورة التالية:

$$\frac{I}{H} T_d = B\left[1-\left(\frac{t-12}{T_d/2}\right)^2\right] \quad (45.2)$$

حيث: t، هي التوقيت الشمسي بالساعة، B، ثابت. وتكامل المعادلة السابقة على طول ساعات الشروق إلى الغروب يعطي:



شكل (9.2) نسبة الإشعاع الشمس الكلي الساعتي إلى اليومي على مدار اليوم



شكل (10.2) نسبة الإشعاع الشمس المنتشر الساعتي إلى اليومي على مدار اليوم

$$\int_{t_{sr}}^{t_{ss}} \frac{I}{H} T_d \, dt = \int_{t_{sr}}^{t_{ss}} B \left[1 - \left(\frac{t-12}{T_d/2} \right)^2 \right] dt \qquad (46.2)$$

أي أن: $T_d = B\frac{2}{3}T_d$، حيث: $\int_{t_{sr}}^{t_{ss}} \frac{I}{H}\, dt = 1$. وبهذا، معادلة (47.3) تصبح:

$$\frac{I}{H} = \frac{3}{2T_d} \left[1 - \left(\frac{t-12}{T_d/2} \right)^2 \right] \qquad (47.2)$$

وباستخدام منحنى جيب تمام الزاوية، يمكن تمثيل المعادلة السابقة بالصورة التالية:

$$\frac{I}{H} = \frac{\pi}{2T_d} \cos \left[\frac{180 \times (t-12)}{T_d} \right] \qquad (48.2)$$

ويمكن التنبؤ بالإشعاع المنتشر الساعتي المعطى بالمعادلة (39.2) من المعادلتين التاليتين:

$$\frac{I_d}{H_d} = \frac{3}{2T_d} \left[1 - \left(\frac{t-12}{T_d/2} \right)^2 \right] \qquad (49.2)$$

أو:

$$\frac{I_d}{H_d} = \frac{\pi}{2T_d} \cos \left[\frac{180 \times (t-12)}{T_d} \right] \qquad (50.2)$$

وفي الخلاصة، إذا كان الإشعاع الكلي اليومي معلوماً، فان الإشعاع الكلي الساعتي يمكن التنبؤ به باستخدام المعادلات (38.2)، (39.2)، (47.2)، أو (48.2). بالإضافة إلى أنه، بمعلومية الإشعاع المنتشر اليومي، فان الإشعاع المنتشر الساعتي يمكن التنبؤ به، وذلك باستخدام المعادلات (42.2)، (49.2)، أو (50.2).

مثال 4.2

احسب الإشعاع الكلي الساعي الساقط على سطح أفقي بين الساعة 1 ـ 2 بعد الزوال الشمسي لمدينة براك ليوم 21 يونيو. إذا كان مقياس الإشعاع الكلي اليومي

لسطح أفقي يساوي $H = 31.6\ MJ/m^2$. قارن النتائج المتحصل عليها باستخدام النماذج الرياضية التالية:

أ) المعادلة (38.2)　　　ب) المعادلة (39.2)

ج) المعادلة (47.2)　　　د) المعادلة (48.2)

الحل:

$$L = 27°36' = 27.60° \quad , \quad n = 172 \quad , \quad \delta = 23.45°$$

عند الساعة 1:30 بعد الزوال الشمسي تكون زاوية الساعة: $h = 22.50°$

يُحسب طول اليوم الشمسي من المعادلة (10.2):

$$T_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}[-\tan L \tan \delta]$$

$$T_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}[-\tan 27.60 \tan 23.45] = 13.70 = 13:43\ hr$$

وبهذا تكون زاوية ساعة الغروب: $h_{ss} = 102.82°$

وساعة الشروق: $t_{sr} = 5.15 = 05:09\ hr$

وساعة الغروب: $t_{ss} = 18.85 = 18:15\ hr$

أ) باستخدام المعادلة (38.2)

$$\frac{I}{H} = \frac{1}{2}\left\{\cos\left[\frac{180(t_1 - t_{sr})}{T_d}\right] - \cos\left[\frac{180(t_2 - t_{sr})}{T_d}\right]\right\}$$

$$= \frac{1}{2}\left\{\cos\left[\frac{180(13 - 5.15)}{13.71}\right] - \cos\left[\frac{180(14 - 5.15)}{13.71}\right]\right\} = 0.11$$

$$I = 0.11 \times 31.6 = 3.476\ MJ/m^2$$ ◁

ب) باستخدام المعادلة (39.2)

$$\frac{I}{H}=\frac{\pi}{24}(a+b\cos h)\frac{\cos h-\cos h_{ss}}{\sin h_{ss}-\left(\frac{\pi h_{ss}}{180}\right)\cos h_{ss}}$$

$$a=0.409+0.5016\sin(h_{ss}-60)=0.750$$

$$b=0.6609-0.4767\sin(h_{ss}-60)=0.337$$

وبالتعويض في المعادلة (39.2) نحصل على النسبة: $I/H=0.116$

◁ $I=0.116\times31.6=3.666\ MJ/m^2$

ج) باستخدام المعادلة (47.2)

$$\frac{I}{H}=\frac{3}{2T_d}\left[1-\left(\frac{t-12}{T_d/2}\right)^2\right]$$

◁ $I=0.104\times31.6=3.286\ MJ/m^2$

د) باستخدام المعادلة (48.2)

$$\frac{I}{H}=\frac{\pi}{2T_d}\cos\left[\frac{180\times(t-12)}{T_d}\right]$$

◁ $I=0.108\times31.6=3.413\ MJ/m^2$

(ب) استخدام القياسات الكلية الساعية

أشتقت الصيغة الأساسية لهذه المعادلة من قبل (Liu, Jordan, 1960)، ثم عُدلت من قبل العديد من الباحثين، (Spencer, 1982) حصل على صيغة عامة تُطبق في معظم أجزاء العالم، وهي على الصورة التالية:

$$\frac{I_d}{I} = a \qquad , \quad 0 < I/I_o < 0.35$$
$$= b - c(I/I_o) \qquad , \quad 0.35 \le I/I_o \le 0.75 \qquad (51.2)$$
$$= d \qquad , \quad I/I_o > 0.75$$

حيث:

$$b = 0.940 + 0.01180\left|L \times \frac{\pi}{180}\right|$$
$$c = 1.185 + 0.01350\left|L \times \frac{\pi}{180}\right| \qquad (52.2)$$
$$a = b - 0.3\,c$$
$$d = b - 0.75\,c$$

حيث: L، زاوية خط العرض بالدرجات، I_d/I، نسبة الإشعاع المنتشر الكلي الساعتي إلى الإشعاع الكلي الساعتي، I/I_o، نسبة الإشعاع الكلي الساعتي إلى الإشعاع الجوي الساعتي.

مثال 5.2

قدر الإشعاع المنتشر الساعتي الساقط على سطح أفقي في مدينة براك بين الساعتين 1:00–2:00 بعد الزوال الشمسي ليوم 21 يونيو، إذا كان الإشعاع الكلي الساعتي المقاس $3.50\ MJ/m^2$.

الحل:

$L = 27.60^\circ \quad , \quad n = 172 \quad , \quad \delta = 23.45^\circ$

عند الساعة 1:00 بعد الزوال، زاوية الساعة تساوي $h_1 = 15^\circ$ ؛

عند الساعة 2:00 بعد الزوال، زاوية الساعة تساوي $h_2 = 30^\circ$ ؛

باستخدام المعادلة (21.2)

$$I_o = \frac{12\times 3600}{\pi}1353\left(1+0.033\cos\frac{360\times 172}{365}\right)\left[\frac{\pi}{180}(30-15)\times\sin 27.60\times\sin 23.45+\right.$$
$$\left.\cos 27.60\times\cos 23.45\times(\sin 30-\sin 15)\right] = 4.4\ MJ/m^2$$

$\frac{I}{I_o}=\frac{3.50}{4.4}=0.8$، ولأن $\frac{I}{I_o}>0.75$، فإنه يمكن استخدام المعادلات المناسبة من مصفوفة المعادلة (51.2)، (52.2):

$$b = 0.940+0.0118\times\left(27.60\times\frac{\pi}{180}\right)=0.9457$$

$$c = 1.185+0.0135\times\left(27.60\times\frac{\pi}{180}\right)=1.1915$$

$$d = 0.9457-0.75\times 1.1915 = 0.0521$$

$$I_d = I\times d = 3.5\times 0.0521 = 0.1824\ MJ/m^2$$ ◁

2.9.2 نماذج لتقدير الإشعاع الشمسي اليومي

هناك العديد من النماذج الرياضية التجريبية التي أشتقت للتنبؤ بالإشعاع اليومي. وتستخدم هذه النماذج القياسات التالية:

(أ) قياسات طول اليوم الشمسي بالساعات.

(ب) قياسات مؤشر الوضوح اليومي.

(أ) **استخدام قياسات ساعات السطوع اليومية،** T_s

وهي تستخدم للتنبؤ بالإشعاع المتشر الكلي اليومي، وذلك باستخدام الصيغة التالية:

$$\frac{H}{H_o} = a + b\ (T_s/T_d) + c\ (T_s/T_d)^2 \qquad (53.2)$$

$$\frac{H_d}{H} = d + e\ (T_s/T_d) + f\ (T_s/T_d)^2 \qquad (54.2)$$

حيث: T_d، أقصى ساعات سطوع يومية محتملة، f, e, d, c, b, a، ثوابت تعتمد على الموقع المعين للدراسة. يمكن الإطلاع على العديد من هذه المعادلات في (Duffie, Beckman, 1991).

(ب) **استخدام قياسات مؤشر الوضوح اليومي،** K_T

ويعرف هذا المؤشر بأنه، معدل الإشعاع الكلي اليومي إلى الإشعاع الجوي اليومي وكلاهما للسطح الأفقي (H/H_o). وتكون المعادلات التجريبية على الصورة:

$$H_d/H = a + b\,K_T + c\,K_T^2 + d\,K_T^3 + e\,K_T^4 \qquad (55.2)$$

هذه المعادلة طورت من قبل العديد من الباحثين لأجزاء عديدة في العالم. طور أربس وغيره (Erbs et al.,1982) مجموعة من المعادلات التجريبية وذلك اعتمادا على تصنيف فصلي يقوم على أساس زاوية غروب الشمس h_{ss}، كالتالي:

	شتاء عندما	$h_{ss} < 81.4^\circ$
(56.2)	ربيعاً و خريفاً عندما	$81.4^\circ \le h_{ss} \le 98.6^\circ$
	صيفاً عندما	$h_{ss} > 98.6^\circ$

وبالاعتماد على قيمة h_{ss}، طور أربس وغيره (Erbs et al.,1982) المعادلات التجريبية التالية:

في حالة $h_{ss} < 81.4°$ (شتاء)

$$\frac{H_d}{H} = 1.0 - 0.2727\,K_T + 2.4495\,K_T^2 - 11.9514\,K_T^3 + 9.3879\,K_T^4 \quad , \quad K_T < 0.715$$
$$= 0.143 \quad , \quad K_T \geq 0.715 \qquad (57.2 أ)$$

في حالة $h_{ss} \geq 81.4°$ (ربيع، خريف أو صيف)

$$\frac{H_d}{H} = 1.0 + 0.2832\,K_T - 2.5557\,K_T^2 + 0.8448\,K_T^3 \quad , \quad K_T < 0.722$$
$$= 0.175 \quad , \quad K_T \geq 0.722 \qquad (57.2 ب)$$

بينما طور كولاريس ورابل (Collares, Rabl, 1979) معادلة عامة، وهي على الصورة التالية:

$$\frac{H_d}{H} = 0.99 \quad , \quad K_T \leq 0.17$$
$$= 1.188 - 2.272\,K_T + 9.473\,K_T^2 - 21.865\,K_T^3 + 14.648\,K_T^4 \quad , \quad 0.17 < K_T < 0.75$$
$$= 0.632 - 0.54\,K_T \quad , \quad 0.75 < K_T < 0.80$$
$$= 0.2 \quad , \quad K_T \geq 0.80 \qquad (58.2)$$

مثال 6.2

قدر الإشعاع المنتشر اليومي الساقط على سطح أفقي في مدينة براك ليوم 21 يونيو، إذا كان الإشعاع اليومي الكلي $31.6\ MJ/m^2$.

الحل:

من المثال 2.2، $H_o = 29.6\ MJ/m^2$, $h_{ss} = 104.7°$

إذن: $K_T = H/H_o = 31.6/29.6 = 1.0676$

باستخدام المعادلة (57.2 ب)

$H_d/H = 0.175$

$$H_d = 0.175 \times 31.6 = 5.53\ MJ/m^2$$ ◁

3.9.2 نماذج لتقدير المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي اليومي

(أ) قياس المتوسط الشهري لساعات السطوع اليومية، T_s

طورت العديد من المعادلات التجريبية إلى الصورة التالية:

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H}_o} = a + b\left(\frac{\overline{T}_s}{\overline{T}_d}\right) \qquad (59.2)$$

حيث $\overline{T}_d, \overline{H}_o$، المتوسط الشهري لقيم T_d, H_o. قيم $\overline{H}_d, \overline{H}_o$ تقدر عند اليوم الوسيط لكل شهر. اليوم الوسيط يمثل اليوم الذي له نفس قيمة متوسط الإشعاع الجوي اليومي على السطح الأفقي $\overline{H}_o$. قيم هذه الأيام مدرجة في الجدول (6.2) كما وردت في (Moustafa et al, 1994). b, a، ثوابت مأخوذة من الجدول (7.2) لعدد من المواقع حول العالم كما وردت في (Duffie, Beckman,1991).

جدول (6.2) اليوم الوسيط لكل شهر

17 يناير	15 مايو	15 سبتمبر
16 فبراير	11 يونيو	15 أكتوبر
16 مارس	17 يونيو	14 نوفمبر
15 أبريل	16 أغسطس	10 ديسمبر

جدول (7.2) قيم ثوابت المناخ a , b، للاستخدام في المعادلة (59.2)

b	a	النسب المحتملة لساعات السطوع		النباتات[2]	المناخ[1]	الموقع
		المتوسط	المدى			
0.37	0.41	78	85-68	E	BS-BW	Albuquerque, NM
0.26	0.38	59	71-45	M	Cf	Atlanta, GA
0.50	0.22	52	60-42	D	Df	Blue Hill, MA
0.31	0.35	62	80-47	GDsp	BS	Brownsville, TX
0.50	0.26	59	68-47	G	Cf	Buenos Aires, Argentina.
0.09	0.48	67	75-60	E	Cf	Charleston, SC
0.23	0.36	67	81-55	D	Dw	Darien, Manchuria
0.20	0.54	84	88-78	Dsi	BW	El Paso, TX
0.18	0.54	77	89-61	Bzi	BW	Ely, NV
0.57	0.22	36	49-11	D	Cf	Hamburg, Germany
0.73	0.14	65	77-57	G	Af	Honolulu, HI
0.34	0.30	58	72-40	M	Df	Madison, WI
0.34	0.34	58	84-41	GD	Aw-BS	Malaga, Angola
0.22	0.42	65	71-56	E-GD	Aw	Miami, FL
0.63	0.17	61	76-49	SE	Cs	Nice, France
0.51	0.30	37	49-25	S	Am	Poona, India (Monsoon)
0.34	0.41	81	65-89			(Dry)
0.39	0.28	48	56-34	B	Af	Kisangani, Zaire
0.43	0.30	83	88-76	Dsp	BW	Tamanrasset, Algeria

ملاحظات على الجدول (7.2)

(1) تصنيف المناخ على أساس خريطة (Trewartha, 1961, 1954)، حيث نوع المناخ كالتالي:

Af - مناخ الغابات الاستوائية، رطوبة ثابتة؛ ممطرة على مدار السنة.

Am - مناخ الغابات الاستوائية، أمطار موسمية؛ موسم جفاف قصير، لكن كمية الأمطار كافية لدعم نمو الغابات الممطرة.

Aw - مناخ الغابات الاستوائية، موسم الجفاف شتاءاً.

BS - مناخ سهلي قاحل أو شبه صحراوي.

BW - مناخ صحراوي.

Cf - مناخ الغابات المدارية، رطوبة ثابتة؛ ممطرة على مدار السنة.

Cs - مناخ الغابات المدارية، موسم الجفاف شتاءاً.

Df - مناخ الغابات الثلجية المدارية، رطوبة ثابتة؛ ممطرة على مدار السنة.

Dw - مناخ الغابات الثلجية المدارية، موسم الجفاف شتاءاً.

(2) تصنيف النباتات على أساس خريطة Kuchler، حيث نوع النباتات كالتالي:

B - أشجار عريضة الأوراق دائمة الخضرة.

Bzi - شجيرات عريضة الأوراق دائمة الخضرة، أقل ارتفاع لها 3 قدم؛ تنمو منفردة أو في مجموعات أو مقاطعات.

D - أشجار عريضة الأوراق غير دائمة الخضرة.

Dsi - شجيرات عريضة الأوراق غير دائمة الخضرة، أقل ارتفاع لها 3 قدم؛ تنمو منفردة أو في مجموعات أو مقاطعات.

E - أشجار أبرية الأوراق دائمة الخضرة.

G - نباتات عشبية.

GD - نباتات عشبية، أشجار عريضة الأوراق غير دائمة الخضرة.

GDsp - نباتات عشبية، شجيرات عريضة الأوراق غير دائمة الخضرة، أقل ارتفاع لها 3 قدم؛ تنمو منفردة أو في مجموعات أو مقاطعات.

M - خليط من: أشجار عريضة الأوراق غير دائمة الخضرة وأشجار أبرية الأوراق دائمة الخضرة.

S - خليط من: أشجار عريضة الأوراق دائمة الخضرة وأشجار عريضة الأوراق غير دائمة الخضرة.

SE - خليط من: أشجار عريضة الأوراق دائمة الخضرة وأشجار عريضة الأوراق غير دائمة الخضرة وأشجار أبرية الأوراق دائمة الخضرة.

ملاحظة: بُنيت هذه الثوابت على أساس معلومات الإشعاع المتوفرة حتى عام 1966، ولا تعكس التطورات الجارية على عملية معالجة أو تفسير المعلومات التي أُجريت بعد ذلك. قُيمت هذه النتائج من قبل المحطات الجوية الأمريكية والتي بدورها قد تكون مغايرة لأي معلومات مناخية أخرى. يُنصح باستخدام هذه المعلومات فقط في حالة عدم توفر معلومات الإشعاع المحلية.

(ب) قياس المتوسط الشهري لمؤشر الوضوح اليومي، $\overline{K}_T$

يمكن تعريف هذا المؤشر بأنه، معدل المتوسط الشهري للإشعاع الكلي اليومي إلى المتوسط الشهري للإشعاع الجوي اليومي للسطح الأفقي، $(\overline{H}/\overline{H}_o)$. قام (Erbs et al., 1982) بتطوير معادلات للمتوسط الشهري وهي كالمعادلات اليومية، وهي تعتمد على التصنيف الموسمي المذكور سابقاً. هذه المعادلات هي:

في حالة $h_{ss} \le 81.4°$ (شتاء) و $0.3 \le \overline{K}_T \le 0.8$

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1.391 - 3.560 K_T + 4.189 K_T^2 - 2.137 K_T^3 \qquad \text{(60.2 أ)}$$

في حالة $h_{ss} > 81.4°$ (ربيع، خريف أو صيف) و $0.3 \le \overline{K}_T \le 0.8$

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1.331 - 3.022 K_T + 3.427 K_T^2 - 1.821 K_T^3 \qquad \text{(60.2 ب)}$$

فيما قام (Collares, Rabl, 1979) بتطوير المعادلة العامة التالية بدلالة زاوية ساعة الغروب:

$$\begin{aligned}\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} &= 0.775 + 0.00606(\overline{h}_{ss} - 90) \\ &- [0.505 + 0.00455(\overline{h}_{ss} - 90)]\cos(115 K_T - 103)\end{aligned} \qquad (61.2)$$

حيث: $\overline{h}_{ss}$، متوسط زاوية ساعة الغروب بالدرجات، $\overline{K}_T = (\overline{H}/\overline{H}_o)$، قيمة $\overline{H}_o$ تقدر عند اليوم الوسيط للشهر المدرج في الجدول (5.3). (Klein, 1977) قام بحساب قيم المتوسط الشهري للإشعاع الجوي اليومي على سطح أفقي $\overline{H}_o$ لأيام الوسيط لكل شهر ولعدد من خطوط العرض الشمالية والجدول (8.2) يبين هذه القيم.

جدول (8.2) المتوسط الشهري للإشعاع الجوي اليومي على سطح أفقي $\overline{H}_o$ ، (kJ/m^2)

12/10	11/14	10/15	9/15	8/16	7/17	6/11	5/15	4/15	3/16	2/16	1/17	L°N
22,669	24,909	29,413	34,238	37,832	39,606	40,046	39,356	37,111	32,848	28,115	23,902	25
19,714	22,161	27,213	32,917	37,534	40,071	40,706	39,569	36,436	31,141	25,679	21,034	30
16,687	19,296	24,820	31,348	36,976	40,292	41,129	39,530	35,497	29,200	23,072	18,069	35
13,626	16,344	22,255	29,542	36,166	40,281	41,328	39,247	34,303	27,040	20,319	15,403	40
10,579	13,344	19,541	27,515	35,118	40,055	41,322	38,737	32,869	24,677	17,448	11,998	45
07,605	10,342	16,705	25,283	33,851	39,644	41,147	38,025	31,209	22,131	14,490	08,987	50
04,791	07,396	13,778	22,863	32,391	39,100	40,863	37,152	29,345	19,423	11,486	06,082	55

مثال 7.2

يُقدر المتوسط الشهري للإشعاع اليومي الساقط على سطح أفقي في مدينة براك بحوالي $30.3\ MJ/m^2$. أوجد جزء الإشعاع المنتشر للإشعاع اليومي المتوسط.

الحل:

باستخدام الجدول (6.2)، فإن اليوم المتوسط لشهر يونيو هو 11 يونيو، أي أن $n = 162$.

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (284 + 162)\right) = 23.09^\circ$$

$$\overline{h}_{ss} = \cos^{-1}[-\tan 27.6 \times \tan 23.09] = 102.88^\circ$$

باستخدام المعادلة (22.2)

$$\overline{H}_\circ = \frac{24 \times 3600}{\pi} \times 1353 \times \left[1 + 0.033 \times \cos\left(\frac{360}{365} \times 162\right)\right]\left[\frac{\pi \times 102.88}{180} \times \sin 27.6 \times \right.$$

$$\left. \sin 23.09 + \cos 27.6 \times \cos 23.45 \times 102.88\right] = 40.42\ MJ/m^2$$

$$\overline{K}_T = \frac{\overline{H}}{H_\circ} = \frac{30.30}{40.42} = 0.750$$

من المعادلة (61.2):

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 0.775 + 0.00606 \times (102.88 - 90) - [0.505 + 0.00455 \times (102.88 - 90)] \times$$

$$\cos(115 \times 0.75 - 103) = 0.313$$

$$\overline{H}_d = 0.313 \times 30.3 = 9.484\ MJ/m^2$$ ◁

10.2 تقدير الإشعاع الشمسي على الأسطح المائلة

إن كمية الإشعاع المستقبلة من قبل سطح أرضي في موقع وزمن محددين يعتمد على زاويتي اتجاه وميل السطح. كما أن السطح الذي يكون دائماً عمودياً على الأشعة الشمسية، يستقبل الكمية العظمى من هذه الأشعة، وهذا هو هدف أجهزة تتبع حركة الشمس ولكنها مرتفعة التكاليف وفي كثير من الحالات ليست عملية. ولذا أصبحت إمالة المجمعات الشمسية بزاوية ميل معينة هي الطريقة العملية الشائعة. أضف لذلك، أن معظم معلومات الأشعة الشمسية المقاسة أو المحسوبة إما أن تكون للسقوط السوي أو على الأسطح الأفقية، ولذلك وجب تحويل هذه المعلومات إلى أشعة على أسطح مائلة.

الإشعاع الشمسي الساقط على سطح مائل بزاوية s يُعطى بالعلاقة التالية:

$$H_t = H_{b,t} + H_{d,t} + H_{g,t} \qquad (62.2)$$

حيث: H_t = الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح مائل، W/m^2

$H_{b,t}$ = الإشعاع الشمسي المباشر الساقط على سطح مائل، W/m^2

$H_{d,t}$ = الإشعاع الشمسي المنعكس من السماء الساقط على سطح مائل، W/m^2

$H_{g,t}$ = الإشعاع الشمسي المنعكس من الأرض الساقط على سطح مائل، W/m^2

بدلالة الإشعاع المباشر على سطح أفقي والإشعاع المباشر عند السقوط السوي، فانه يمكن صياغة الإشعاع المباشر الساقط على سطح مائل على الصورة التالية:

$$H_{b,t} = H_b \frac{H_{b,t}}{H_b} = H_b R_b \qquad (63.2)$$

حيث R_b ، نسبة الإشعاع المباشر الساقط على سطح مائل إلى الإشعاع المباشر الساقط على سطح أفقي، وتسمى بمعامل الميلان للإشعاع الشمسي. بالإشارة إلى الشكل 16.3، لدينا العلاقات التالية:

$$\cos i = \frac{H_{b,t}}{H_{bn}}, \qquad \cos z = \frac{H_b}{H_{b,n}} \qquad (64.2)$$

بمقارنة المعادلتين السابقتين، فان قيمة R_b تكون مساوية:

$$R_b = \frac{\cos i}{\cos z} \quad \text{،} \quad 0 \leq |i| < 90^\circ \ \text{عندما}$$

$$R_b = 0 \quad \text{،} \quad |i| \geq 90^\circ \ \text{عندما} \qquad (65.2)$$

تستقبل الأسطح المائلة الأشعة الشمسية من الأرض والأسطح المجاورة الأخرى. فإذا كانت انعكاسية سطح الأرض ρ_g لكل من الأشعة المباشرة والمنتشرة، وقيمتها تعتمد على غطاء الأرض وتتراوح بين $0.2 \div 0.7$ للتراب والجليد، على التوالي (Liu, Jordan, 1977)، فان نسبة ما ستعكسه الأرض من الأشعة على السطح المائل يساوي $\rho_g (1-\cos s)/2$ من الأشعة الكلية $(H_b + H_d)$. وبهذا يمكن صياغة $H_{g,t}$ كالتالي:

$$\begin{aligned} H_{g,t} &= (H_b + H_d)\rho_g \frac{(1-\cos s)}{2} \\ &= (H_b + H_d)\rho_g \sin^2(s/2) \end{aligned} \qquad (66.2)$$

مقدار الإشعاع المنتشر من السماء يعتمد على كثافة الغيوم ومدى رؤية السطح المائل للقبة السماوية. فالأسطح المائلة ترى جزء من القبة السماوية تساوي $(1+\cos s)/2$ أو $\cos^2(s/2)$. في المراجع المتخصصة يوجد هناك نموذجان لحساب

المركبة $H_{d,t}$. النموذج الأول يُسمى نموذج درجة الحرارة الثابتة (isotropic) ويطبق هذا النموذج في حالة السماء الصافية كلياً. أما النموذج الثاني فهو نموذج درجة الحرارة المتغيرة (anisotropic) وينصح باستخدامه في حالة ما تكون السماء مغيمة جزئياً. أقترح (Klucher,1979) الصياغة التالية للنموذج الثاني:

$$H_{d,t} = H_d \left(\frac{H_d}{H}\right) \cos^2(s/2)\left[1 + F\sin^3(s/2)\right]\left[1 + F\cos^2 i \sin^3 z\right] \qquad (67.2)$$

حيث: $F = 1 - (H_d/H)^2$

ففي الحالة القصوى، عندما تكون السماء غائمة كلياً (النموذج الأول)، فإن $(H_d/H) = 1$ وبالتالي $F = 0$، وبهذا فالمعادلة السابقة يمكن إعادة صياغتها على صورة النموذج الأول كالتالي:

$$H_{d,t} = \frac{(1 + cos\, s)}{2} H_d = H_d\, cos^2(s/2) \qquad (68.2)$$

وبذلك فالصيغة النهائية لنسبة لإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح مائل إلى الساقط على سطح أفقي بنموذج درجة الحرارة الثابتة، وإذا ما اعتبرنا أنه $H_b = H - H_d$، يصبح:

$$\frac{H_t}{H} = \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) R_b + \frac{H_d}{H}\cos^2\left(\frac{s}{2}\right) + \rho_g \sin^2\left(\frac{s}{2}\right) \qquad (69.2)$$

ولنموذج درجة الحرارة المختلفة فان نسبة الإشعاع الشمسي يكون على الصورة التالية:

$$\frac{H_t}{H}=\left(1-\frac{H_d}{H}\right)R_b+\frac{H_d}{H}\cos^2\left(\frac{s}{2}\right)\left[1+F\sin^3(s/2)\right]\left[1+F\cos^2 i\sin^3 z\right] \\ +\rho_g\sin^2\left(\frac{s}{2}\right) \qquad (70.2)$$

يمكن الحصول على الإشعاع الساعتي الساقط على سطح مائل بتكامل المعادلة (62.2) لمدة الساعة الواحدة من t_1 إلى t_2 لتعطي:

$$\int_{t_1}^{t_2} H_t\,dt=\int_{t_1}^{t_2} H_{b,t}\,dt+\int_{t_1}^{t_2} H_{d,t}\,dt+\int_{t_1}^{t_2} H_{g,t}\,dt \qquad (71.2)$$

وباستخدام نموذج درجة الحرارة الثابتة فإن المعادلة السابقة تصبح:

$$\frac{I_t}{I}=\left(1-\frac{I_d}{I}\right)R_b+\frac{I_d}{I}\cos^2\left(\frac{s}{2}\right)+\rho_g\sin^2\left(\frac{s}{2}\right) \qquad (72.2)$$

أيضاً، باستخدام نموذج درجة الحرارة المختلفة، فالمعادلة الأسبق تصبح

$$\frac{I_t}{I}=\left(1-\frac{I_d}{I}\right)R_b+\frac{I_d}{I}\cos^2\left(\frac{s}{2}\right)\left[1+F_I\sin^3(s/2)\right]\left[1+F_I\cos^2 i\sin^3 z\right] \\ +\rho_g\sin^2\left(\frac{s}{2}\right) \qquad (73.2)$$

حيث I الإشعاع اليومي و F_I تُعطى بالعلاقة:

$$F_I=1-\left(I_d/I\right)^2 \qquad (74.2)$$

نسبة الإشعاع المباشر الساعتي للسطح المائل إلى السطح الأفقي R_{bI} يُعطى كالتالي:

$$R_{bI}=\frac{h_{t2}-h_{t1}}{h_{h2}-h_{h1}}\frac{\cos i}{\cos z} \qquad (75.2)$$

حيث i، زاوية السقوط على السطح المائل عند منتصف الفترة h_{t1}, h_{t2}، z، زاوية سمت الشمس عند منتصف الفترة h_{h1}, h_{h2}، حيث:

$$h_{t1} = \max(h_1, h_{srt})$$
$$h_{t2} = \min(h_2, h_{sst})$$
$$h_{h1} = \max(h_1, h_{sr}) \qquad (76.2)$$
$$h_{h2} = \min(h_2, h_{ss})$$

الرموز h_1, h_2 ، تشير إلى زوايا الساعة عند بداية ونهاية مدة ساعة واحدة، h_{srt} ، زاوية شروق الشمس للسطح المائل، h_{sst} ، زاوية غروب الشمس للسطح المائل. لقد أوجد (Bushnll, 1982) صيغاً لتحديد h_{srt} ، h_{sst} وهي في هذه الحالة كالتالي:

$$\left.\begin{aligned} h'_{srt} &= -\arccos(-a/D) + \arccos(c/D) \\ h'_{sst} &= \arccos(-a/D) + \arcsin(c/D) \end{aligned}\right\}$$

مع: (77.2)

$$h_{srt} = \max(h_{sr}, h'_{srt}), \quad h_{sst} = \min(h_{ss}, h'_{sst})$$
$$\left|\frac{a}{D}\right| \le 1 \quad , \quad \left|\frac{C}{D}\right| \le 1$$

حيث:

$$\left.\begin{aligned} a &= \sin\delta(\sin L\cos s - \cos L\sin s\cos\psi) \\ b &= \cos\delta(\cos L\cos s - \sin L\sin s\cos\psi) \\ c &= \cos\delta\sin s\sin\psi \\ D &= (b^2 + c^2)^{1/2} \end{aligned}\right\} \qquad (78.2)$$

لا توجد ساعة شروق أو غروب إذا كانت $|a/D|$ أو $|c/D|$ أكبر من الواحد. عندما $s = 0$ فان معادلات h_{srt}, h_{sst} تُختصر إلى تلك المستخدمة لحساب h_{sr}, h_{ss} ، على التوالي.

بتكامل المعادلة (62.2) من الشروق إلى الغروب نحصل على الإشعاع اليومي الساقط على سطح مائل ويُعطى كالتالي:

$$H_t = \int_{tsr}^{t_{ss}} \left(H_{b,t} + H_{d,t} + H_{g,t}\right) dt \qquad (79.2)$$

حيث t_{ss}, t_{sr} ، زمن الشروق والغروب للسطح الأفقي. لنموذج isotropic للإشعاع المعادلة السابقة تصبح:

$$\frac{\overline{H}_t}{\overline{H}} = \left(1 - \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}\right)\overline{R}_b + \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}\cos^2\left(\frac{s}{2}\right) + \rho_g \sin^2\left(\frac{s}{2}\right) \qquad (80.2)$$

حيث $\overline{R}_b$ ، نسبة المتوسط الشهري للإشعاع اليومي الساقط على سطح مائل إلى ذلك الساقط على السطح الأفقي. لقد قدم ليو وجوردان لسطح متجه جنوباً (Liu, Jordan, 1977) الصيغة التالية:

$$\overline{R}_b = \frac{\cos(L-s)\cos\delta \sin h'_{ss} + (\pi/180)h'_{ss}\sin(L-s)\sin\delta}{\cos L\cos\delta\sin h_{ss} + (\pi/180)h_{ss}\sin L\sin\delta} \qquad (81.2)$$

حيث: L ، زاوية خط العرض، s ، زاوية ميل السطح، δ ، زاوية ميلان الشمس، h_{ss} ، زاوية ساعة الغروب للسطح الأفقي، h'_{ss} ، زاوية ساعة الغروب للسطح المائل، وتعطى بالمعادلة:

$$h'_{ss} = \min\left\{\begin{array}{c}\arccos[-\tan L\tan\delta] \\ \arccos[-\tan(L-s)\tan\delta]\end{array}\right\} \qquad (82.2)$$

ولسطح في النصف الجنوبي للكرة الأرضية ومتجه شمالاً، $\psi = 180°$ ، $\overline{R}_b$ تصبح:

$$\overline{R}_b = \frac{\cos(L+s)\cos\delta \sin h'_{ss} + (\pi/180)h'_{ss}\sin(L+s)\sin\delta}{\cos L\cos\delta\sin h_{ss} + (\pi/180)h_{ss}\sin L\sin\delta} \qquad (83.2)$$

وكذلك:

$$h'_{ss} = \min\left\{\begin{array}{c}\arccos[-\tan L\tan\delta] \\ \arccos[-\tan(L+s)\tan\delta]\end{array}\right\} \qquad (84.2)$$

قدم (Klein, 1977) صيغة $\overline{R}_b$ وهي على الصورة التالي:

$$\overline{R}_b = \frac{R_1}{R_2} \qquad \text{(أ 85.2)}$$

$$\begin{aligned} R_1 = & (\cos s \ \sin \delta \ \sin L)\ (h_{sst} - h_{srt})\ (\pi/180) \\ & - (\sin \delta \ \cos L \ \sin s \ \cos \psi)\ (h_{sst} - h_{srt})\ (\pi/180) \\ & + (\cos L \ \cos \delta \ \cos s)\ (\sin h_{sst} - \sin h_{srt}) \\ & + (\cos \delta \ \cos \psi \ \sin L \ \sin s)\ (\sin h_{sst} - \sin h_{srt}) \\ & - (\cos \delta \ \sin s \ \sin \psi)\ (\sin h_{sst} - \sin h_{srt}) \end{aligned} \qquad \text{(ب 85.2)}$$

$$R_2 = 2\left(\cos L \cos \delta \sin h_{ss} + \frac{\pi}{180} h_{ss} \ \sin L \sin \delta\right) \qquad \text{(جـ 85.2)}$$

حيث ψ، زاوية اتجاه السطح.

مثال 8.2

أوجد نسبة الإشعاع الكلي الساقط على سطح مائل إلى الإشعاع الكلي الساقط على سطح أفقي عند الساعة 1:30 بعد الزوال الشمسي. زاوية ميل السطح $30°$ عن الأفقي وزاوية الاتجاه $45°$ إلى الشرق من الجنوب. وذلك في مدينة براك ليوم 21 يونيو. أفرض أن نسبة الإشعاع المنتشر إلى الكلي تساوي 0.1.

الحل:

$$L = 27.60° \quad , \quad s = 30° \quad , \quad \psi = -45°$$

بما أن $\frac{H_d}{H} = 0.1$، فإنه يجب استخدام نموذج درجة الحرارة المختلفة. من المعادلة (67.2) نحصل على:

$$F = 1 - (0.1)^2 = 0.99$$

من المثال (3.2) لدينا: $\delta = 23.45°$, $Z = 20.69°$, $h = 22.5°$

وتُحسب زاوية السقوط من المعادلة (6.2):

$$\cos i = \sin 27.6 \times \sin 23.45 \times \cos 30 - \cos 27.6 \times \sin 23.45 \times \sin 30 \times \cos(-45) +$$

$$\cos 27.6 \times \cos 23.45 \times \cos 22.5 \times \cos 30 + \sin 27.6 \times \cos 23.45 \times \cos 22.5 \times \sin 30 \times$$

$$\cos(-45) + \cos 23.45 \times \sin 22.5 \times \sin 30 \times \sin(-45) = 0.69986 \Rightarrow i = 45.58^\circ$$

بفرض أن انعكاسية الأرض 0.2، فإن معادلة (70.2) تعطي:

$$\frac{H_t}{H} = (1-0.1) \times \frac{\cos 45.58}{\cos 20.69} + 0.1 \times \cos^2 15 \times \left[1 + 0.99 \times \sin^3 15\right]\left[1 + 0.99 \times\right.$$

$$\left.\cos^2 45.58 \times \sin^3 20.69\right] + 0.2 \times \sin^2 15$$

$$\frac{H_t}{H} = 0.78368$$

◁

مثال 9.2

أوجد نسبة الإشعاع الساعي الساقط على سطح مائل إلى ذلك الساقط على سطح أفقي بين الساعتين 00:1-00:2 بعد الزوال الشمسي. زاوية ميل السطح 30° عن الأفقي وزاوية الاتجاه 45° إلى الشرق من الجنوب. أفرض أن نسبة الإشعاع المنتشر الساعي إلى الإشعاع الكلي تساوي 0.1. وذلك في مدينة براك ليوم 21 يونيو.

الحل:

$$L = 27.60^\circ \quad , \quad s = 30^\circ \quad , \quad \psi = -45^\circ$$

من المثال (4.2)، لدينا: $h_{ss} = 102.88^\circ$, $h_{sr} = -102.88^\circ$, $\delta = 23.45^\circ$

استخدام المعادلات (78.2)، يُعطي:

$$a = \sin 23.45 \left(\sin 27.6 \times \cos 30 - \cos 27.6 \times \sin 30 \times \cos(-45)\right) = 0.035$$

$$b = \cos 23.45\,(\cos 27.6 \times \cos 30 - \sin 27.6 \times \sin 30 \times \cos(-45)) = 0.554$$

$$c = \cos 23.45 \times \sin 30 \times \sin(-45) = -0.324$$

$$d = \left(0.554^2 + (-0.324)^2\right)^{1/2} = 0.6418$$

وبهذا فإن قيم: $|c/d| = 0.5048$, $|a/d| = 0.0545$

وبالتالي يجب استخدام المعادلة (77.2):

$$h'_{srt} = -\cos^{-1}(-0.0545) + \sin^{-1}(-0.5048) = -123.44^\circ$$

$$h'_{sst} = \cos^{-1}(-0.0545) + \sin^{-1}(-0.5048) = 62.81^\circ$$

عند الساعة 1:00 بعد الزوال فإن زاوية الساعة تكون: $h_1 = 15^\circ$؛

وعند الساعة 2:00 بعد الزوال فإن زاوية الساعة تكون: $h_2 = 30^\circ$

ومن المعادلة (77.2) نحصل على:

$$h_{t1} = \max(h_1, h'_{srt}) = h_1 = 15^\circ$$

$$h_{t2} = \min(h_2, h'_{sst}) = h_2 = 30^\circ$$

ومن المثال (8.2)، فإن زاوية الساعة عند الساعة 1:30 بعد الزوال تساوي $h = 22.5^\circ$

وزاوية السمت $Z = 20.69^\circ$ ، وزاوية السقوط $i = 45.58^\circ$.

وباستخدام المعادلة (75.2) نحصل على:

$$R_{bI} = \left(\frac{30 - 15}{30 - 15}\right)\left(\frac{\cos 45.58}{\cos 20.69}\right) = 0.7482$$

استخدام المعادلة يُعطي: $F_I = 1 - (0.1)^2 = 0.99$

وبهذا يمكن تطبيق المعادلة (73.2) للحصول على المطلوب:

$$\frac{I_t}{I} = (1-0.1)\times 0.7482 + 0.1\times\cos^2 15\times\left(1+0.99\times\sin^3 15\right)\times$$

$$\left(1+0.99\times\cos^2 45.58\times\sin^3 20.69\right) + 0.2\times\sin^2 15$$

$$\frac{I_t}{I} = 0.803$$ ◁

11.2 زيادة الإشعاع الشمسي

من الممكن زيادة الإشعاع الشمسي الساقط على السطح الماص وذلك باستخدام عاكسات مستوية. وفي النماذج التي نُوقشت سابقًا أُخذت الأشعة المنعكسة الأرضية في الحسبان في الحد الأخير، حيث فرضت الأرض أنها عاكس أفقي لامتناهي المدى. وكان هناك حد واحد فقط في المعادلة (72.2). بانعكاسية أرضية عادية $0.2 \div 0.7$ تكون مساهمة الأشعة المنعكسة جوهرية. وفي هذا الجزء سنوضح حالة خاصة لتأثير العاكسات المتناهية البعد.

الشكل الهندسي الموضح في الشكل (11.2)، يبين سطحين متقابلين، سطح المستقبل c (على سبيل المثال مجمع شمسي) وسطح العاكس r، الزاوية بين السطحين γ. حيث الزاوية γ تساوي $180° - s$ إذا كان العاكس أفقياً. وطول الجهاز m، والأبعاد الأخرى p,n مبينة على الشكل. في حالة العاكس الأفقي، يمكن صياغة المعادلة التالية:

$$I_t = I_t\, R_b + I_d\, F_{c-s} + I_r\, \rho_r\, F_{c-r} + I\, \rho_g\, F_{c-g} \qquad (86.2)$$

حيث F_{c-s} تساوي $(1+\cos s)/2$. معامل الشكل F_{r-c} يمكن الحصول عليه من الشكل (13.2)، F_{c-r} نحصل عليه من علاقة التبادل لمعامل الشكل $A_c\, F_{c-r} = A_r\, F_{r-c}$، F_{c-g} نحصل عليه من خاصية المجموع $F_{c-s} + F_{c-r} + F_{c-g} = 1$.

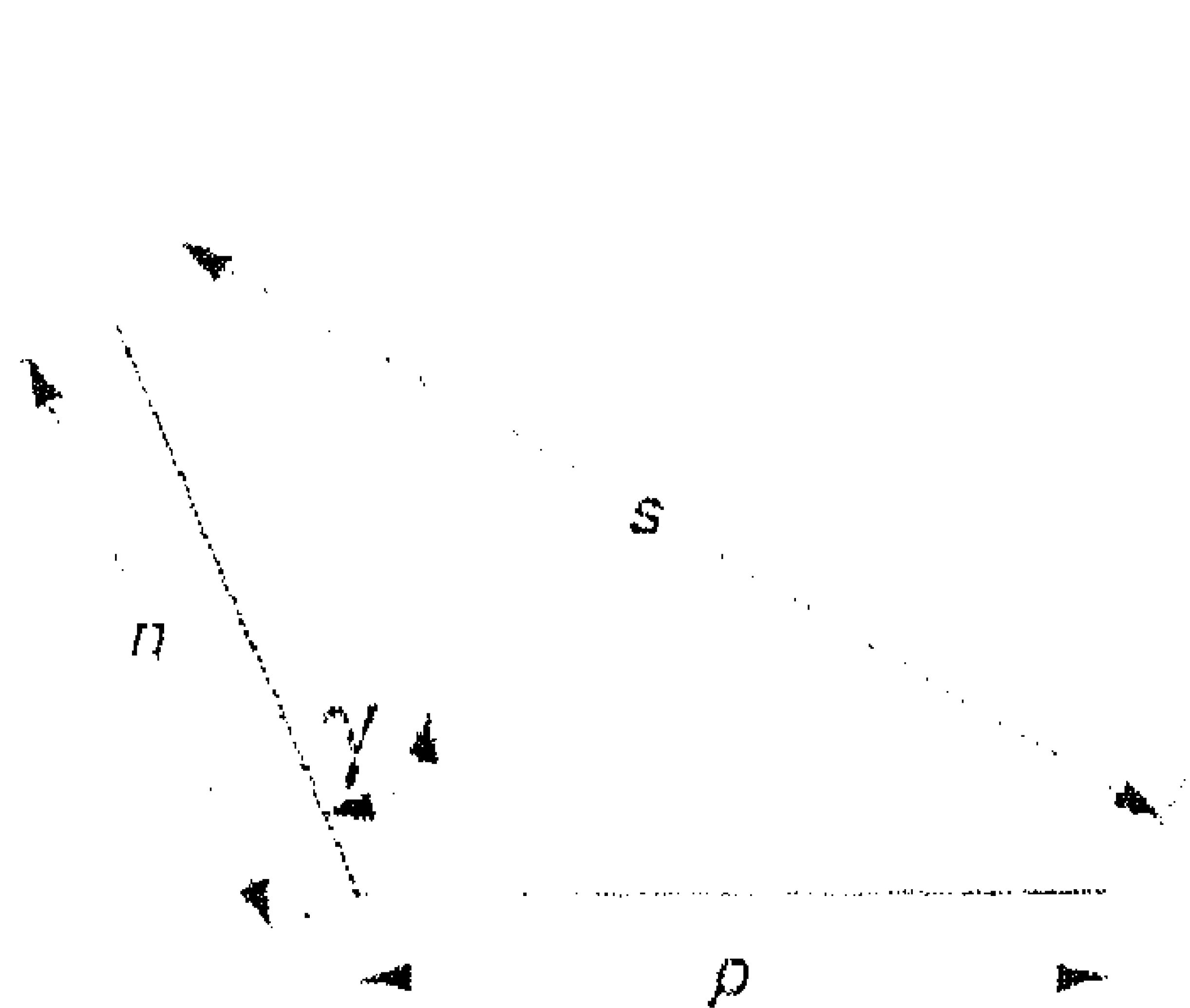
معامل الشكل F_{r-c} مبين في الشكل (13.2)، كدالة في النسب $p/m, n/m$ لزوايا ميل $\gamma = 90°, 120°, 150°$.

إذا كانت الأسطح r, c طويلة جداً (يعني أن m كبيرة بالنسبة للأبعاد p, n)، فان معامل الشكل يُعطى بالعلاقة:

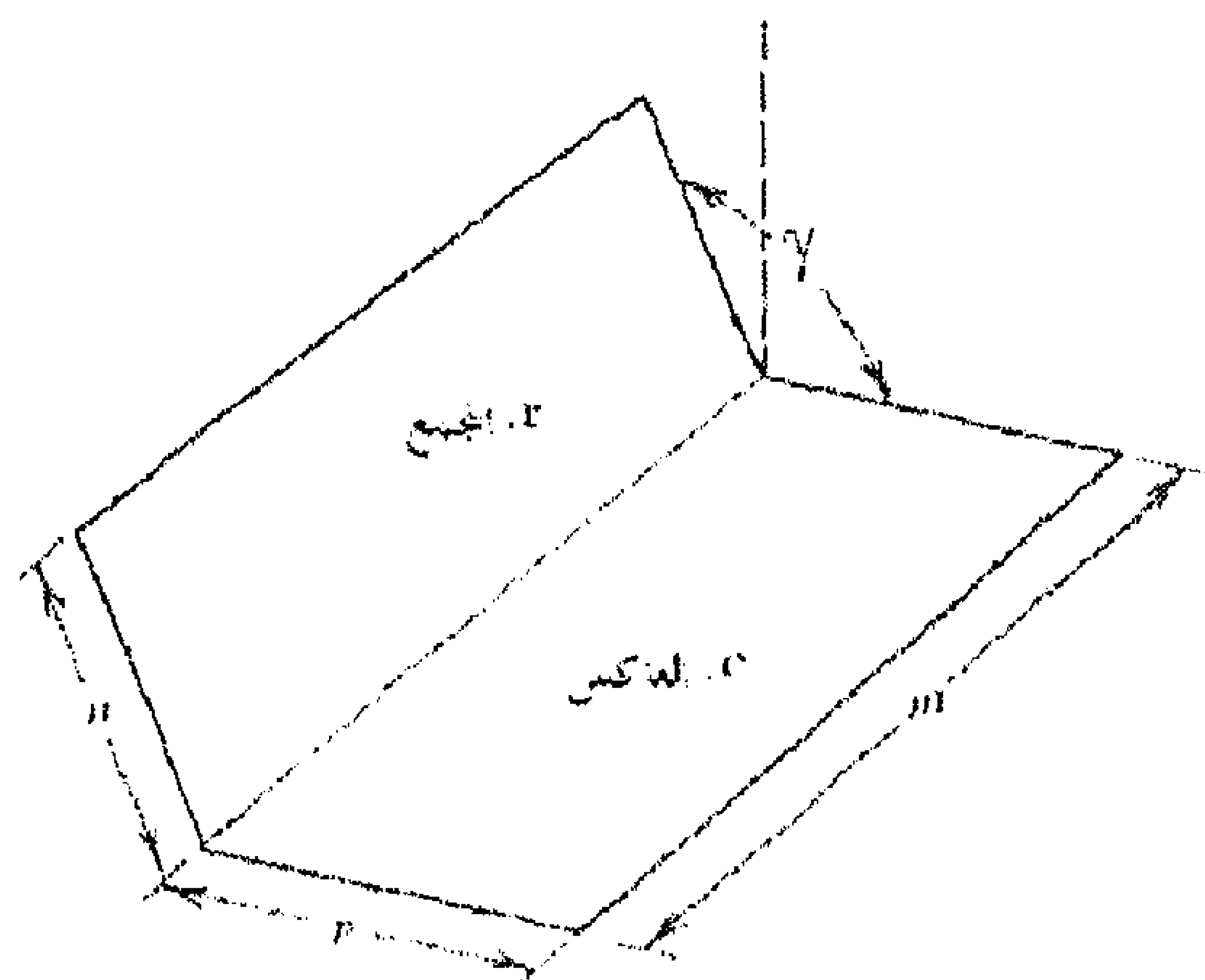
$$F_{r-c} = \frac{n + p - s}{2p} \quad (87.2)$$

حيث s، المسافة من النهاية العليا للمجمع إلى النهاية الخارجية للعاكس، وتقاس في مستوى عمودي على المستويين r, c كما هو مبين في الشكل (12.2)، وقيمتها تساوي:

$$s = \left(n^2 + p^2 - 2np\cos\gamma\right)^{1/2} \quad (88.2)$$



شكل (12.2) المسقط الجانبي لمجمع بعاكس مبيناً الأبعاد وزاوية ميل العاكس مع المجمع



شكل (11.2) رسم تخطيطي لمجمع شمسي بعاكس

من الضروري معرفة الإشعاع الساقط على سطح العاكس. وتُحسب المركبة المباشرة باستخدام R_{br} لاتجاه سطح العاكس. والمركبة المنتشرة يمكن تقدرها من معامل الشكل F_{r-s}. لأي اتجاه للسطح r،

$$F_{r-s} + F_{r-c} + F_{r-g} = 1 \quad (89.2)$$

حيث معاملات الشكل من السطح r إلى كل من: السماء s، السطح c، الأرض g . معامل الشكل F_{r-c} يعين كما ذكر سابقاً، F_{r-g} يساوي صفراً للعاكسات الأفقية. وبهذا وبنفس التقريب السابق فإن، $F_{r-s}=1-F_{r-c}$ لأي حالة عملية (في حالة عدم وجود عوائق).

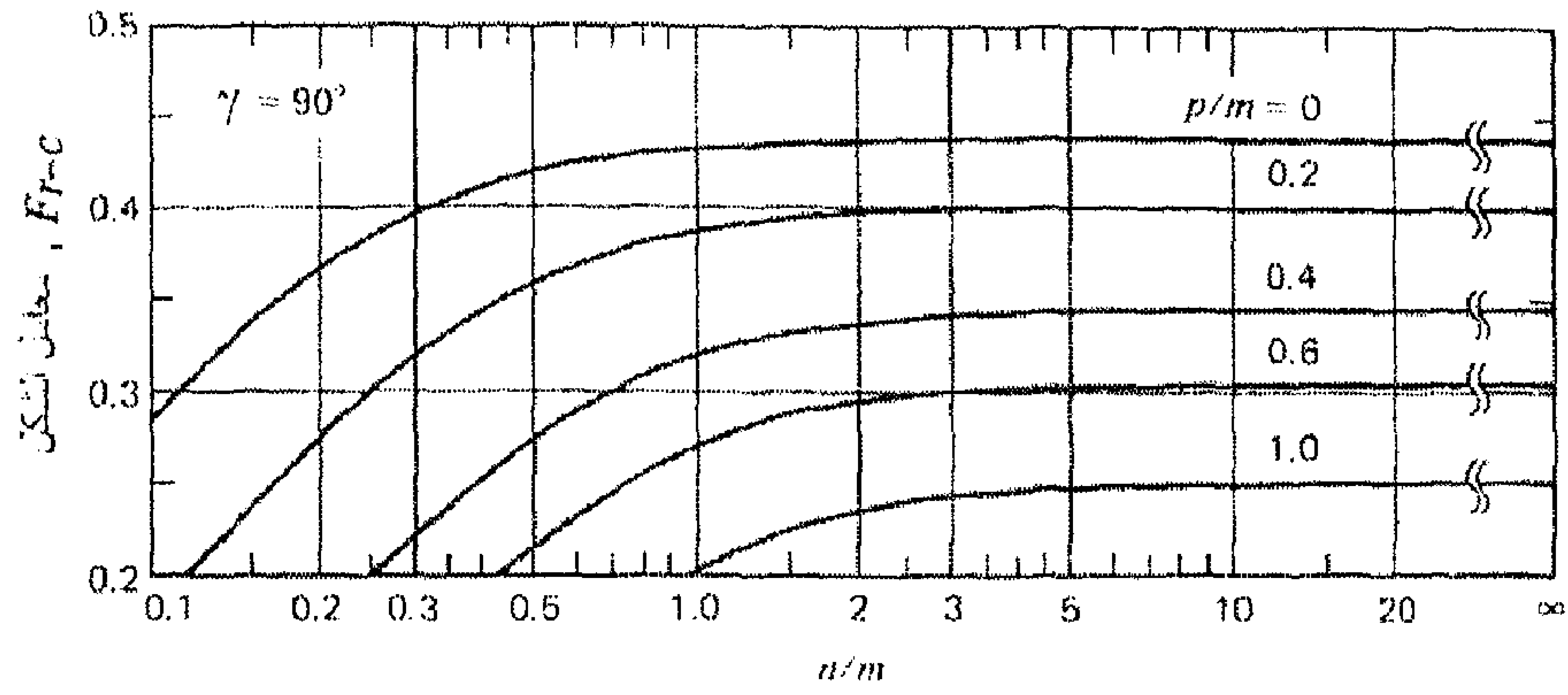
ويبقى إيجاد زاوية سقوط الأشعة المنعكسة من السطح r على السطح c. كتقريب، زاوية السقوط المتوسطة فيمكن أن تؤخذ كتلك المناظرة للإشعاع عند منتصف السطح r وعند منتصف السطح c. كما هو مبين في الشكل (12.2). ولهذا تُعطى زاوية السقوط المتوسطة i_r بالعلاقة التالية:

$$\sin i_r = \frac{p \sin \gamma}{s} \qquad (90.2)$$

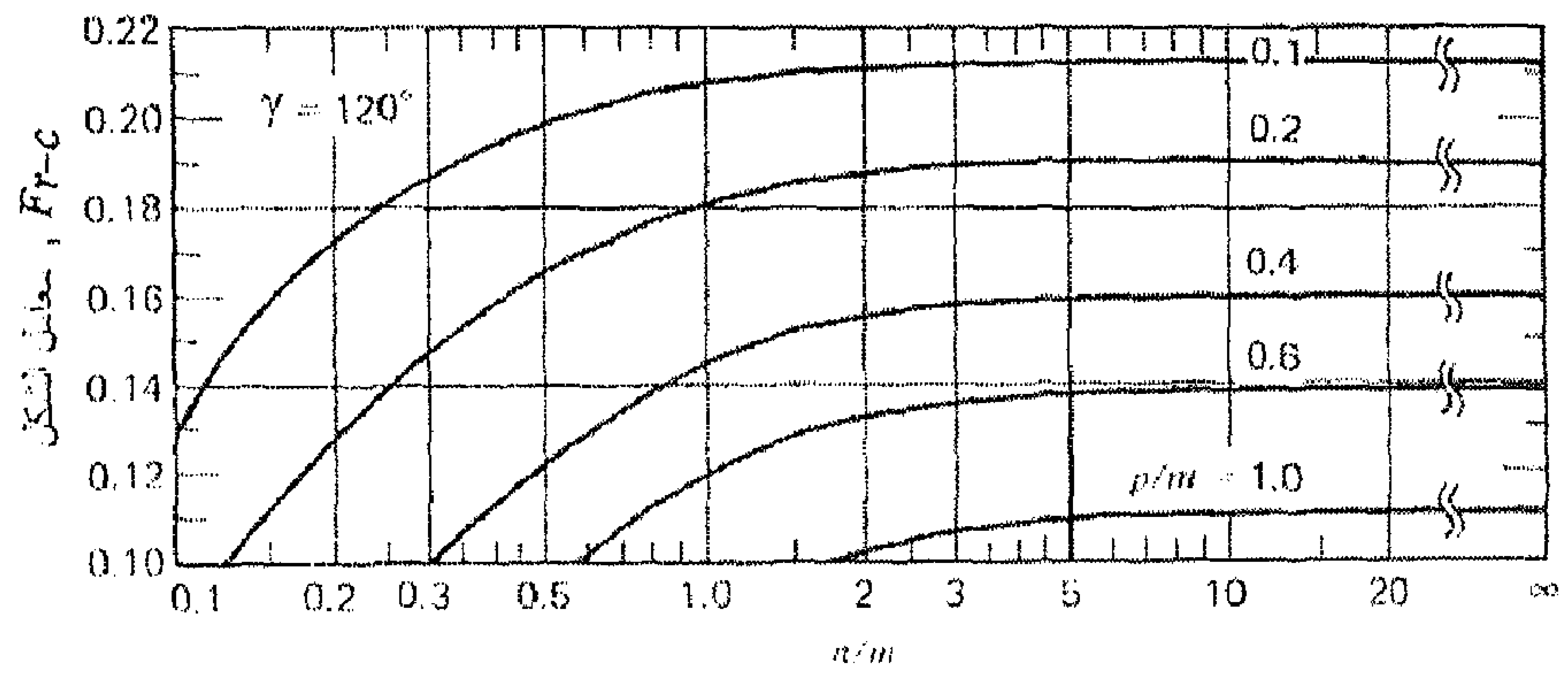
الإشعاع الكلي المنعكس من السطح r وبمساحة A_r وانعكاسية ρ_r إلى السطح c وبمساحة A_c، يكون:

$$A_c\, I_r = \left[I_b\, R_{br} + \left(1-F_{r-c}\right) I_d\right] \rho_r\, A_r\, F_{r-c} \qquad (91.2)$$

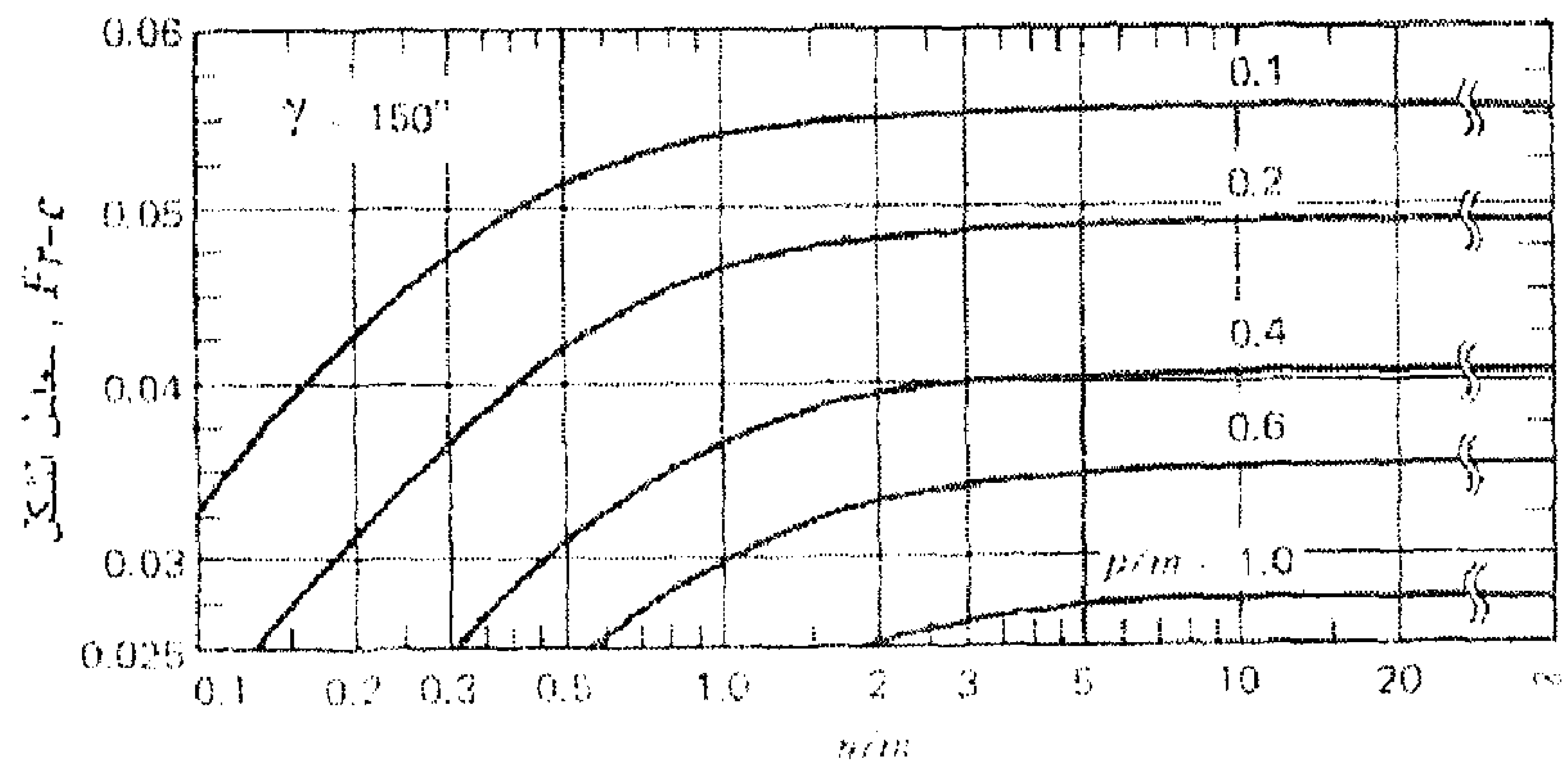
بينا (Bannerot, Howell, 1979) تأثير العاكسات على الإشعاع الكلي على سطح ما، ومساهمة العاكسات في زيادة شدة الإشعاع الشمسي الساقط على المجمعات الشمسية تكون ذات قيمة هامة.



(أ)



(ب)



(جـ)

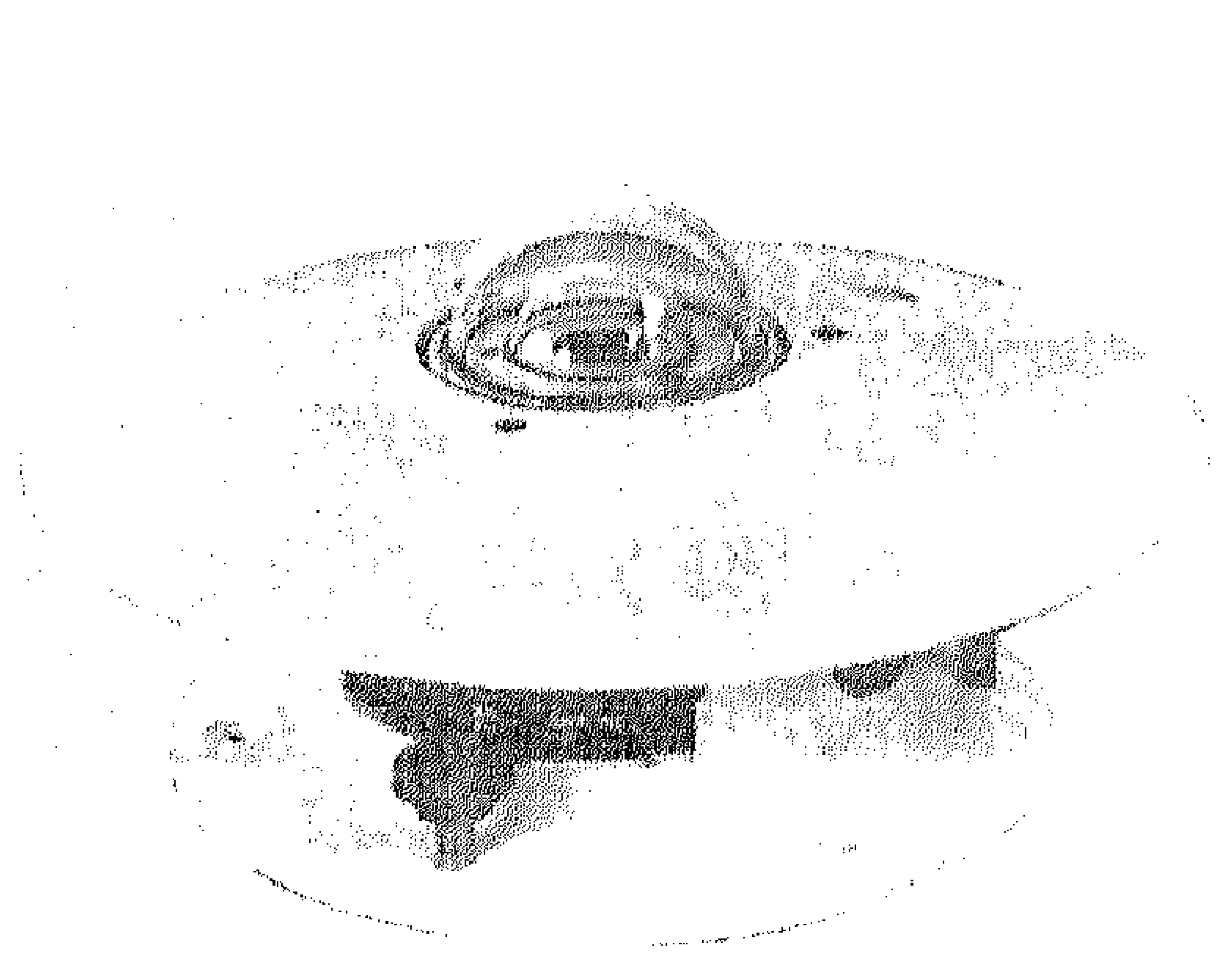
شكل (14.2) معامل الشكل F_{r-c} **كدالة في النسب** $p/m, n/m$ **لزوايا ميل**
$\gamma = 90^{\circ}, 120^{\circ}, 150^{\circ}$

12.2 أجهزة القياس المستخدمة في الطاقة الشمسية

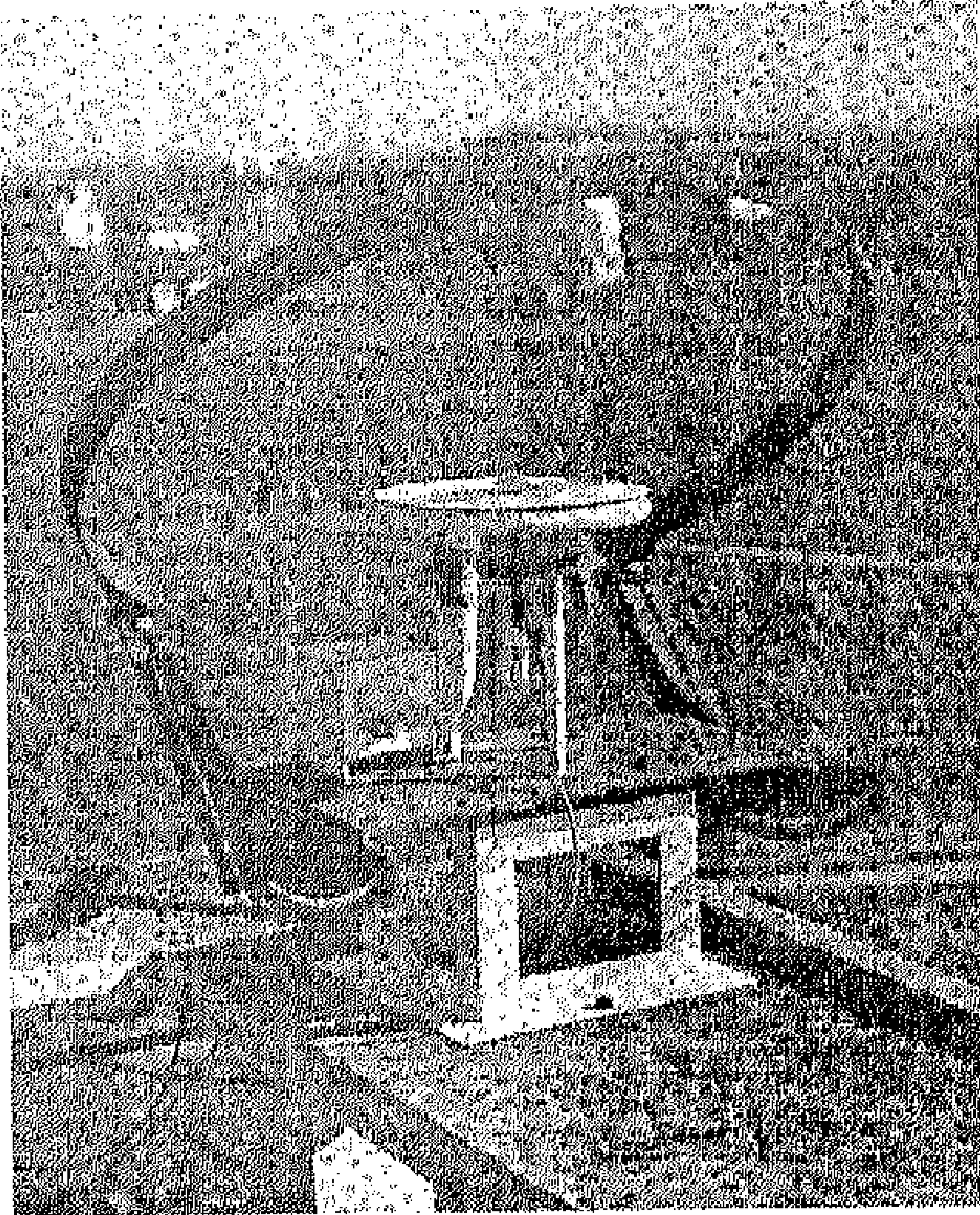
1.12.2 قياس الأشعة الشمسية

الغرض من أجهزة قياس الأشعة الشمسية، هو تعيين القيم اللحظية والطويلة الأمد المتكاملة، لكل من الأشعة المباشرة، المنتشرة والكلية، الساقطة على سطح ما. وتعين قيمة الطاقة الشمسية عن طريق تقنيات قياس، تتضمن استخدام تأثيرات كهروحرارية وفوتوفولتية.

هناك نوعان شائعان من أجهزة قياس الأشعة الشمسية، البيرانوميتر والبيرهيليوميتر. يعتبر البيرانوميتر جهاز لقياس الإشعاع الكلي (المباشر والمنتشر). ويبين الشكل (15.2) جهاز بيرانوميتر عادي. ويمكن أن يُستخدم نفس الجهاز لقياس الأشعة المنتشرة فقط، وذلك عن طريق تظليل عنصر استقبال الأشعة المباشرة، كما هو موضح بالشكل (16.2).

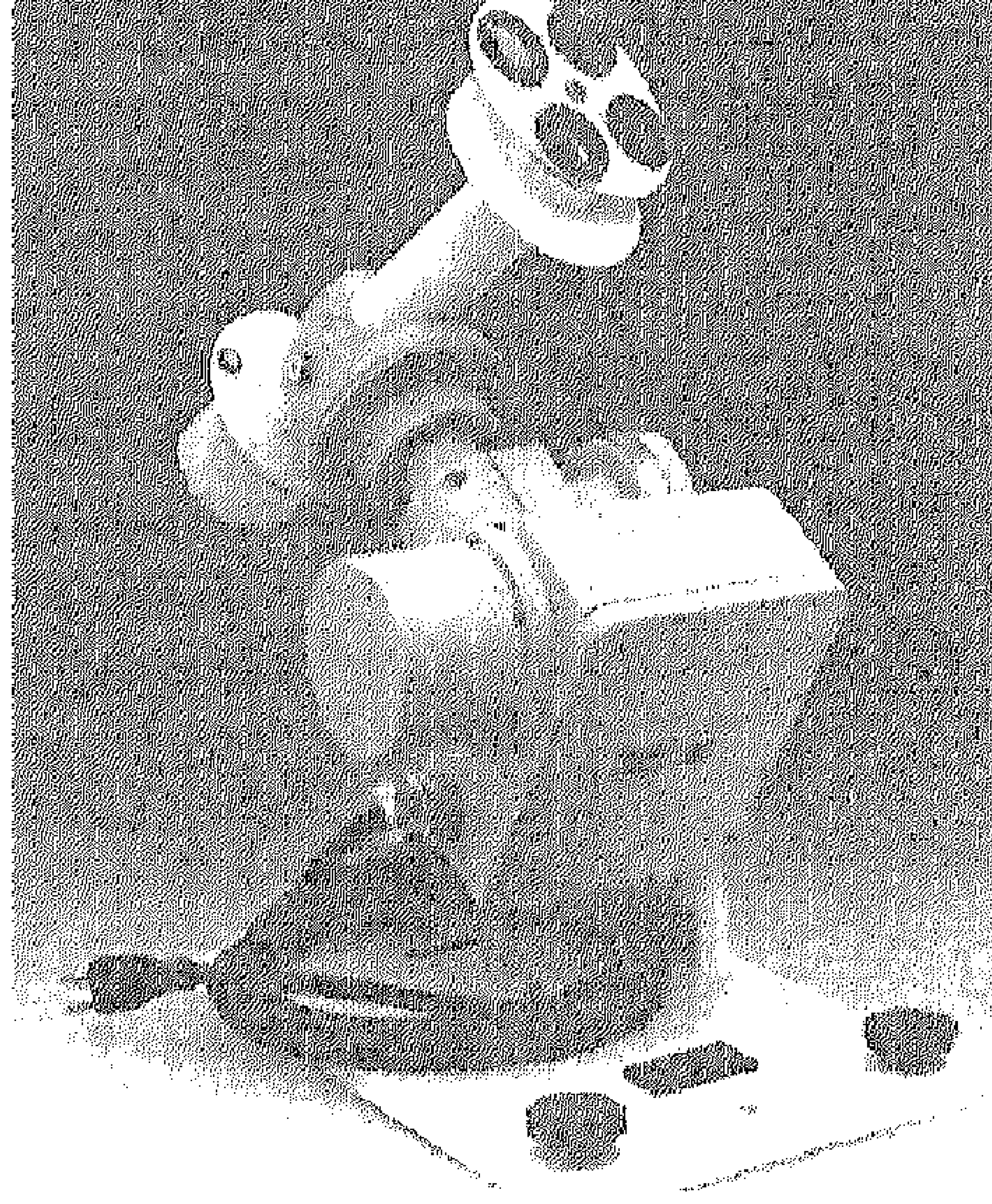


شكل (15.2) جهاز بيرانوميتر عادي لقياس الإشعاع الشمسي الكلي



شكل (16.2) جهاز بيرانوميتر مظلل لقياس الإشعاع الشمسي المنتشر

بينما يعتبر البيرهيليوميتر من الأجهزة التي تستخدم لقياس الإشعاع المباشر عند السقوط العادي. وقد حُذف الإشعاع المنتشر وذلك عن طريق تركيب الحساس في أسفل أنبوب المركز مباشرة باتجاه الشمس. الشكل (17.2) يبين جهاز بيرهيليوميتر عادي.

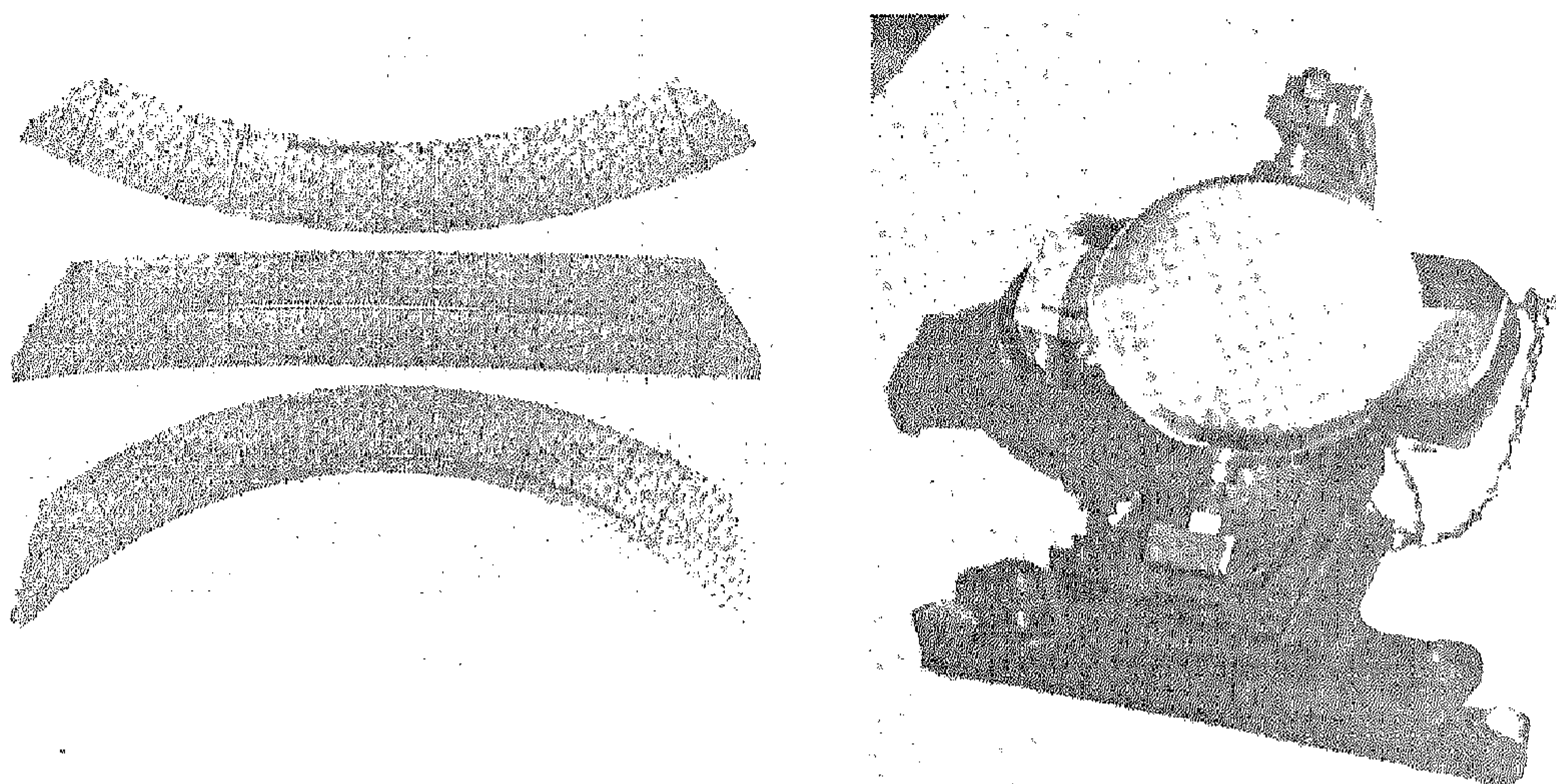


شكل (17.2) جهاز بيرهيليوميتر لقياس الإشعاع الشمسي المباشر

2.12.2 قياس مدة السطوع

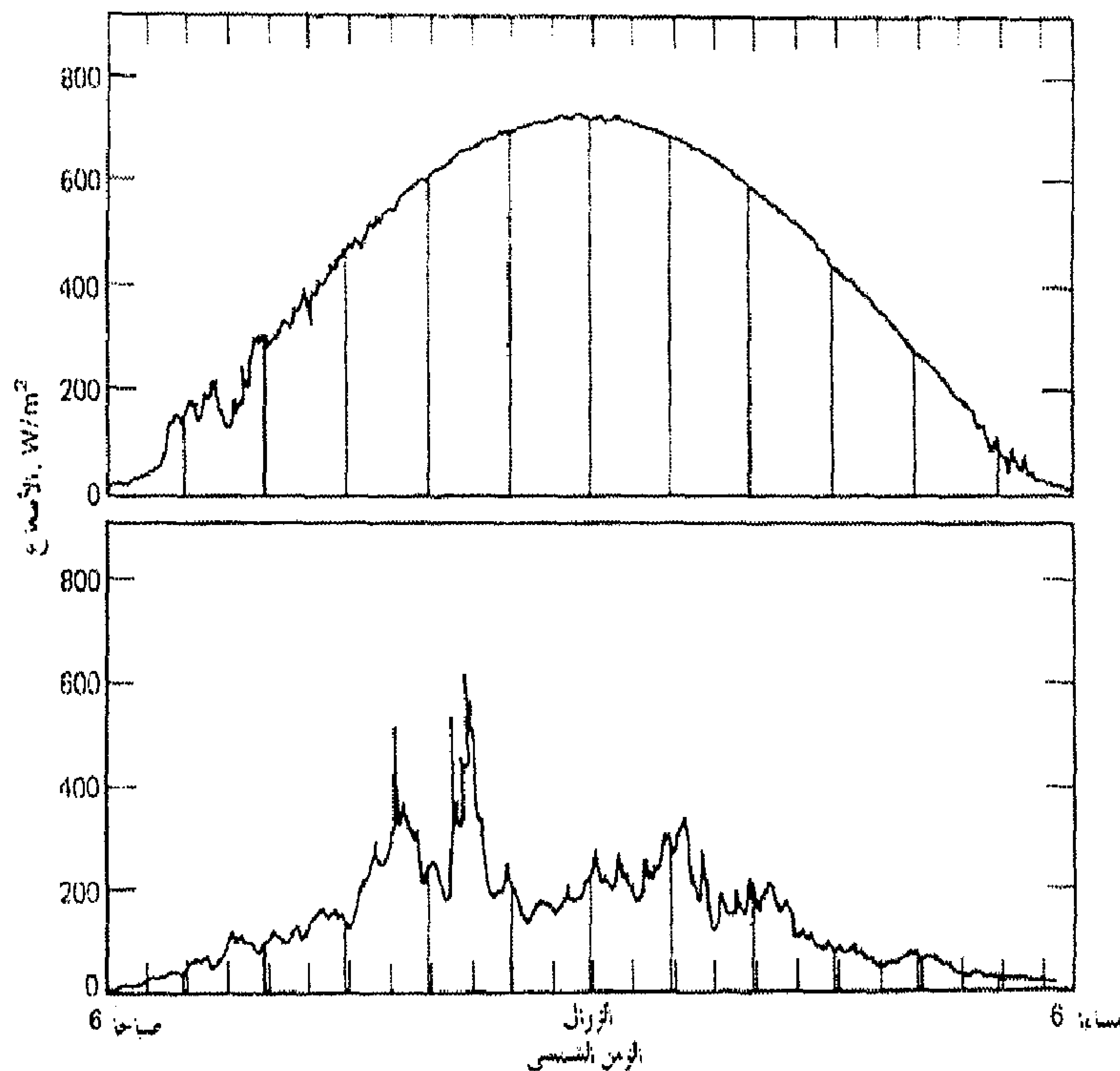
إن ساعات سطوع الشمس، هي الفترة الزمنية التي يكون فيها قرص الشمس مرئياً، ويستخدم لذلك جهازان شائعا الاستخدام وهما: مسجل Campbell-Stokes للسطوع. يستخدم هذا الجهاز، كرة زجاجية بقطر حوالي 10 cm كعدسة تنتج صورة للشمس على سطح موضوع بشكل معكوس للكرة، وشريحة من الورق المعالج مركبة حول جزء مناسب من الكرة، كما هو مبين في الشكل (18.2) وتترك صورة الشمس المنعكسة علامة حرق في الورقة كلما كان

الإشعاع المباشر أكبر من المستوى الحرج. طول النقاط المحروقة على الورقة تزودنا بمؤشر على مدة سطح الشمس. ويعتبر هذا المسجل من أجهزة القياسات الغير دقيقة وذلك لعدة أسباب أهمها: أن الجهاز عديم الاستجابة للمستويات المنخفضة من الإشعاع في بداية ونهاية اليوم، كما أن الرطوبة تؤثر على حالة الورقة. ولهذا قدم (Foster, Foskelt, 1953)، المسجل الكهروضوئي للسطوع أو ما يسمى بمفتاح فوستر للسطوع، ويستخدم هذا الجهاز في معظم المحطات في العالم. يتركب المسجل من عدد 2 من الخلايا الكهروضوئية المصنوعة من مادة السيلينيوم، إحداهما مظللة عن الإشعاع المباشر والأخرى مكشوفة له. عند غياب الإشعاع المباشر، فان الكشافين يشيران تقريباً إلى نفس مستوى الإشعاع، وعند سقوط الأشعة المباشرة على الخلية المكشوفة، فان الخرج من الخلية يكون أكبر من تلك المظللة. وتكون فترة اختلاف الأشعة المسجلة بواسطة الخليتين هي مقياس مدة السطوع الشمسي.



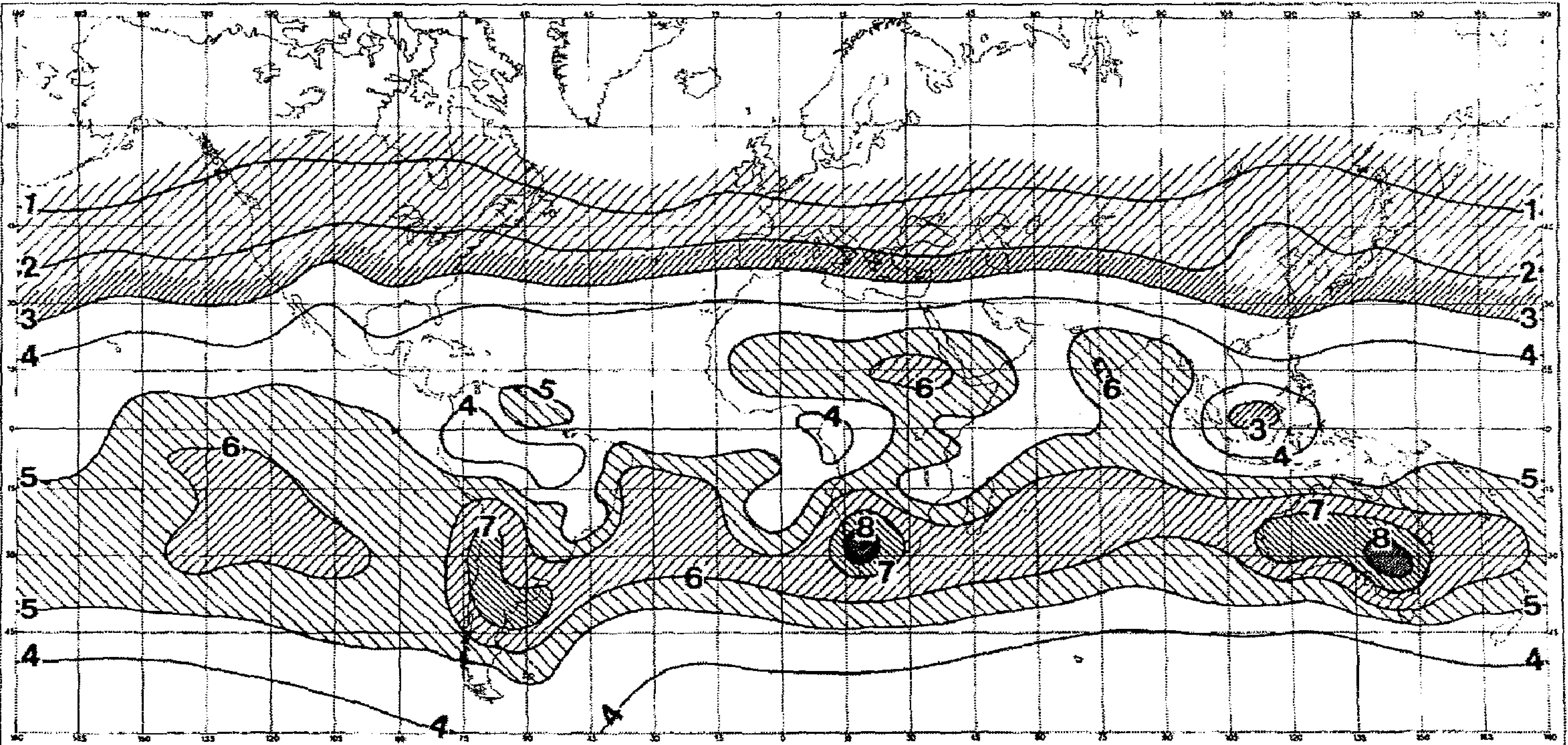
شكل (18.2) مسجل Campbll-Stokes لقياس مدة السطوع، ونماذج من شرائح الورق المستخدم

إن نماذج من قياسات شدة الإشعاع الشمسي الكلي بدلالة الـزمن مدرجـة في الشكل (19.2)، حيث يمثل الشكل العلـوي نموذجـاً للسـماء الصـافية، بينمـا يمثـل الشكل السفلي نموذجاً للسماء الغائمة.

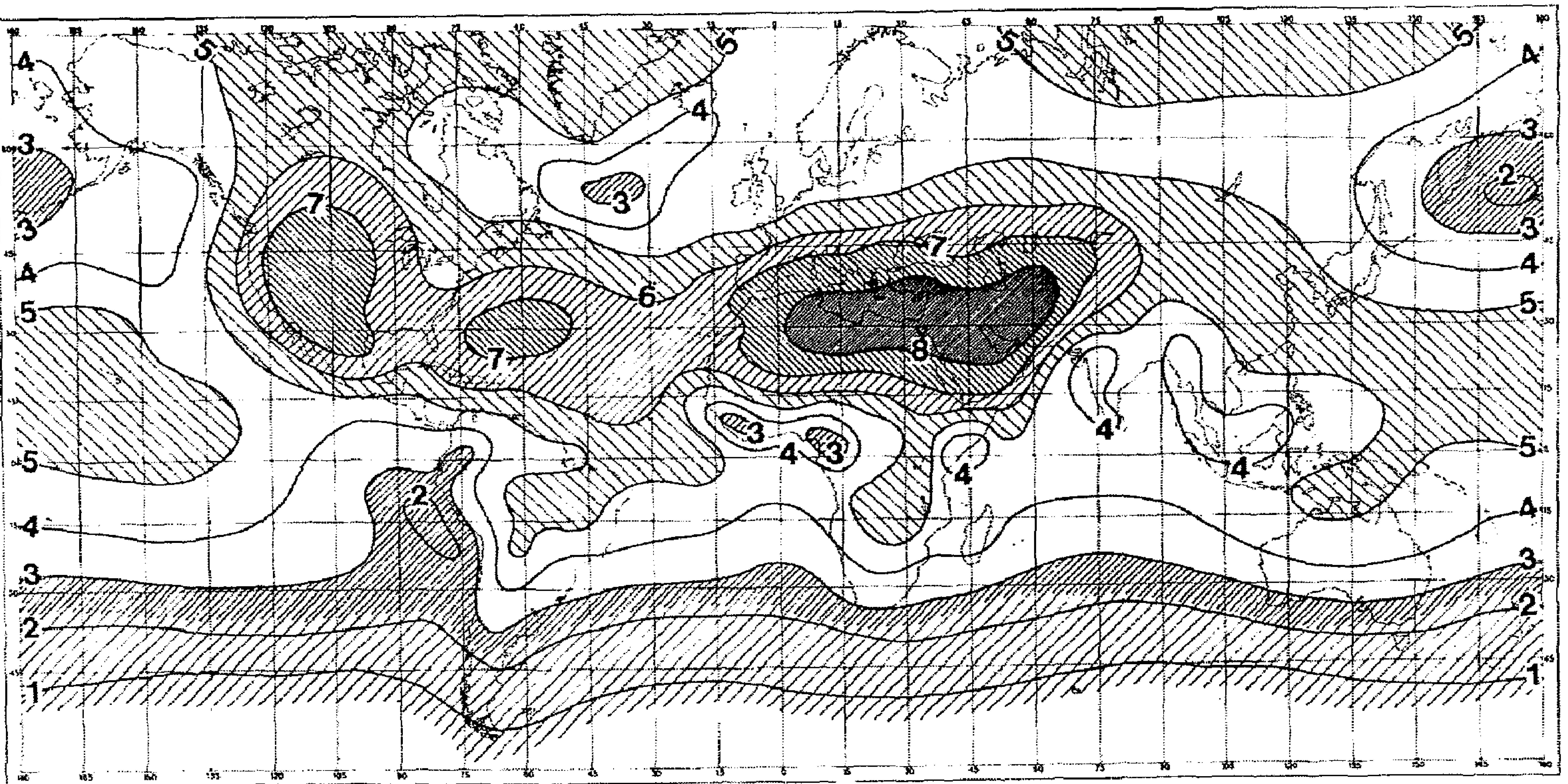


شكل (19.2) نماذج من قياسات شدة الإشعاع الشمسي الكلي، الشكل العلوي يمثل نموذجاً للسماء الصافية، والشكل السفلي يمثل نموذجاً للسماء الغائمة

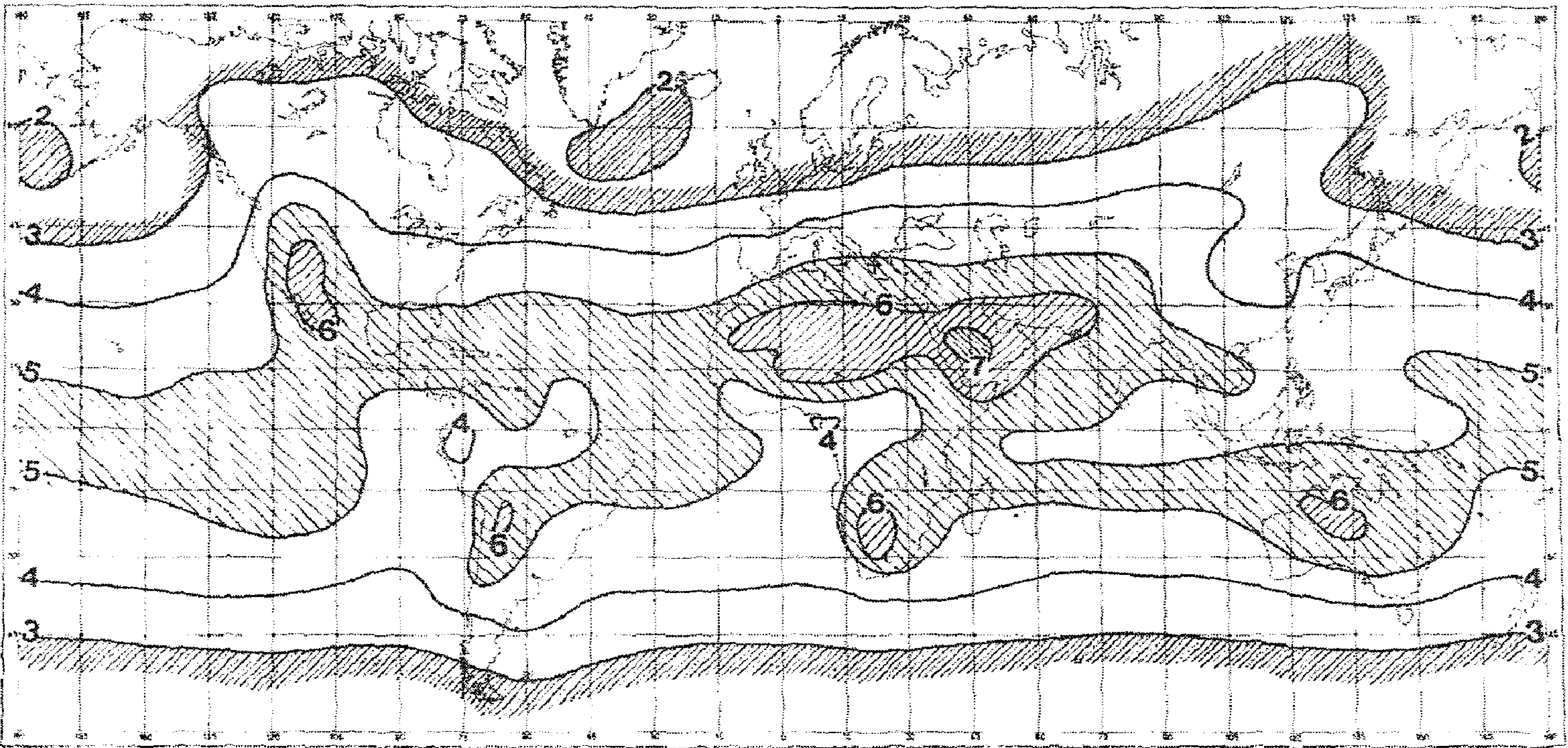
وغالباً ما تُصدر مراكـز الأرصـاد الجويـة الدوليـة نشـراتها الجويـة في صـورة خـرائط للعـالم مبينـة عليهـا دوائـر تمثـل متوسـط الإشـعاع الشمسـي الشـهري، كمـا في الشـكلين (20.2)، (21.2) والمتوسـط السـنوي كمـا في الشـكل (22.2) (World Meteorological Organization, 1981).



شكل (20.2) الإشعاع الشمسي العالمي اليومي - متوسط شهر يناير (صورة من مكتب الأرصاد الجوي، فرنسا)



شكل (21.2) الإشعاع الشمسي العالمي اليومي - متوسط شهر يوليو (صورة من مكتب الأرصاد الجوي، فرنسا)



شكل (22.2) الإشعاع الشمسي العالمي اليومي - المتوسط السنوي (صورة من مكتب الأرصاد الجوي، فرنسا)

المراجع

1. ياسر فتحي نصّار، الطاقة والحياة، 21، 81 (2005)، "محاكاة منظومات تتبع حركة الشمس"، براك – ليبيا.

2. Bannerot, R. B. and Howell, J. R., *Solar Energy*, **22**, 229 (1979)."Predicted Daily and Yearly Average Radiation Performance of Optimal Trapezoidal Groove Solar Energy Collectors."
3. Benseman, R. F. and Cook, F. W., New Zealand J. of Sciences, 12, 696 (1969). "Solar Radiation in New Zealand – The Standard Year and Radiation on Inclined Slopes."
4. Braun, J. E. and J. C. Mitchell, *Solar Energy*, 31, 439 (1983). "Solar Geometry for Fixed and Tracking Surfaces".
5. Bushnell, R.H., *Solar Energy*, **22**, 357 (1982)."A Solution for Sunrise and Sunset Hour Angles on a Tilted Surface Without a Singularity at Zero Azimuth."
6. Collares-Pereiram, M. and Rabl, A., *Solar Energy*, **22**, 155 (1979). "The Average Distribution of Solar Radiation-Correlation between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values."
7. Duffie, J. A., Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Suns inc., 2nd edition, 1991.
8. Erbs, D.G., Klein, S.A. and Duffie, J. A., *Solar Energy*, **28**, 293 (1982)."Estimation of the Diffuse Radiation for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation."
9. Foster, N. B. and Foskett, L. W., Buu. Of the American Meteorological Society, **34**, 212 (1953).
10. Heywood, H., *Solar Energy*, **9**, 223 (1965). "The Computation of Solar Radiation Intensities, Part I".

11. Heywood, H., *Solar Energy*, **9**, 223 (1966). "The Computation of Solar Radiation Intensities, Part II".

12. Hottel, H. C., *Solar Energy*, **18**, 129 (1976)."Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation trough Clear Atmosphere."

13. Hsie, S. J., *Solar Energy Engineering*, Prentic-Hall, (1981).

14. Iqbal, M., *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, Toronto (1983).

15. Iqbal, M., *Solar Energy*, **22**, 87 (1978). "A Study of Canadian Diffuse and Total Solar Radiation Date-II Monthly Average Hourly Radiation."

16. Klein, S. A., *Solar Energy*, **19**, 325 (1977)."Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces."

17. Klucher, T. M., *Solar Energy*, 23, 111 (1979)." Evaluation of Models to predict Insolation on Tilted Surfaces."

18. Kreith, F., Kreider, J.F., *Principles of Solar Engineering*, Hemisphere Publishing Corporation, USA, (1978).

19. Lui, B. Y. and Jordan, R. C., ASHRAE, *In Application of Solar Energy for Heating and Cooling of Building*, (1977). "Availability of Solar Energy for Flat-Plate Solar Heat Collectors."

20. Lui, B. Y. and Jordan, R. C., *Solar Energy*, **4**, 1 (1960)."The Interrelationship and Characteristic distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation."

21. Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source, world meteorological organization, WMO-No.557, technical note No.172, Geneva-Switzerland, ch3, 32 (1981).

22. Mustafa, M. E., Taha, I. S. and Sabbogh, J. A., *Design of Solar Thermal System*, Scientific Publishing Center, King Abdulaziz University, Jeddah, 1991.

23. Newell, T. A., *Solar Energy*, **31**, 339 (1983)."Simple Models for Hourly to Daily Radiation Ratio Correlations."

24. Page, J. K., *Prediction of solar Radiation on Inclined Surfaces*, Reidel (for the Commission of the European Communities), Dordrecht, Holland (1986).

25. Page, J. K., *Proceeding of the UN Conference on New Sources of Energy*, 4, (1964). "The Estimation of Monthly Mean Values of Daily Total Short-Wave Radiation of Vertical and Inclined Surfaces from Sunshine Records for Latitudes $40^{\circ}N - 40^{\circ}S$".

26. Smietana, P. J., Flocchini, R. G., Kennedy, R. L. And Hatfield, J. L., *Solar Energy*, **32**, 417 (1984). "Comparison of Diffuse/Global Ratios Calculated from one-Minute, Hourly and Daily Solar Radiation Data."

27. Whillier, A., *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Series B, **7**, 197 (1956). "The Determination of Hourly Values of Total Radiation from Daily Summations."

الفصل الثالث

مجمعات الطاقة الشمسية الحرارية المستوية

1.3 مقدمة

تعتبر المجمعات الشمسية (اللواقط الشمسية) أساس منظومة الطاقة الشمسية. يمكن إدراج المجمعات الشمسية إلى نوع خاص من المبادلات الحرارية والتي تقوم بتحويل الأشعة الشمسية إلى طاقة حرارية يمكن الاستفادة منها في أي تطبيق حراري. وهناك الكثير من المجمعات الشمسية المختلفة التصاميم والأغراض.

تُصنف المجمعات الشمسية بعدة طرق، ولعل من أهم هذه التصنيفات هو نطاق درجة حرارة المائع العامل في المجمع الشمسي. ودرجة الحرارة هذه إما منخفضة، أو متوسطة، أو مرتفعة. فنطاق درجات الحرارة المنخفضة يتراوح من بضعة درجات إلى 100 درجة مئوية فوق درجة حرارة الوسط المحيط. والمجمعات الشمسية التي تتميز بأفضل أدائها في هذا المدى من درجات الحرارة هي المجمعات الشمسية المستوية. تستخدم المجمعات المستوية عادة لأغراض التسخين وأحياناً للتبريد. بينما يكون مدى درجات الحرارة المتوسطة أعلى بقليل، تتراوح بين 100 – 170 درجة مئوية، فوق درجة حرارة الوسط المحيط. وتندرج تحت هذه الفئة، مجمعات التفريغ والمركزات الخفيفة. وتستخدم في تطبيقات التبريد وبعض العمليات الصناعية الحرارية. أمّا المجمعات الشمسية التي تعمل في ظروف درجات حرارة أعلى من 170 درجة مئوية (البعض منها يصل إلى 3000 درجة مئوية)، فتصنف بأنها مجمعات مرتفعة درجات الحرارة. ويمكن الوصول إلى مثل هذه

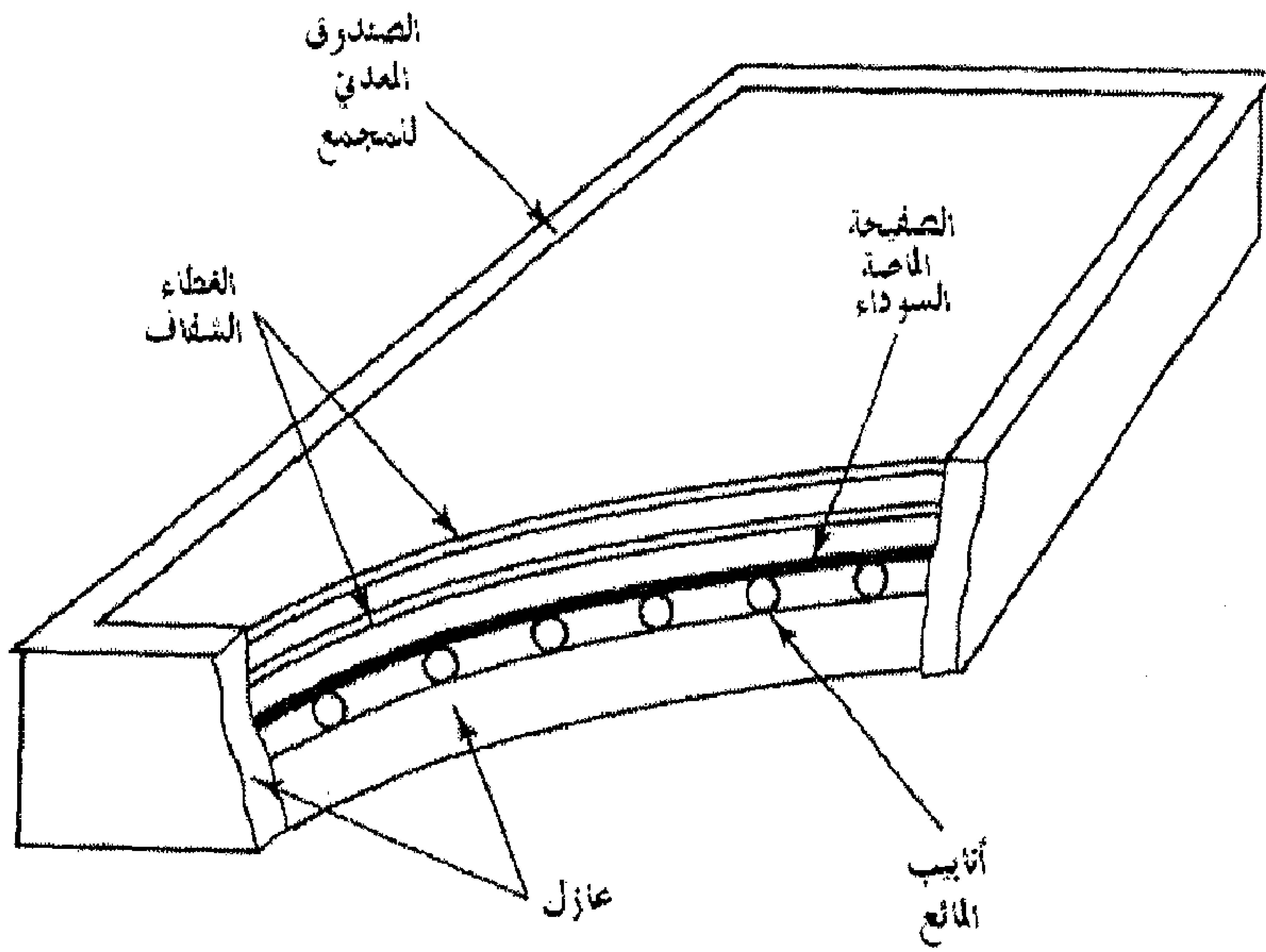
الدرجات من الحرارة المرتفعة باستخدام المركزات الشمسية القوية، والتي تستخدم في الصناعة وفي محطات إنتاج الطاقة الكهربائية.

يتناول هذا الفصل أهم العمليات الحرارية في نماذج من المجمعات الشمسية ودراسة الأداء الحراري لها. وتعتبر هذه الدراسة تطويراً لمفهوم وظائف عناصر المنظومات الشمسية العاملة في مختلف التطبيقات، وتقديم معظم الحالات العملية لحسابات التصاميم الهندسية لها. كما يتضمن الفصل أيضاً طرق اختبار المجمعات الشمسية، استخدام المعلومات المعملية وبعض معلومات المصنّع للتنبؤ بالسلوك الحراري للمجمعات الشمسية.

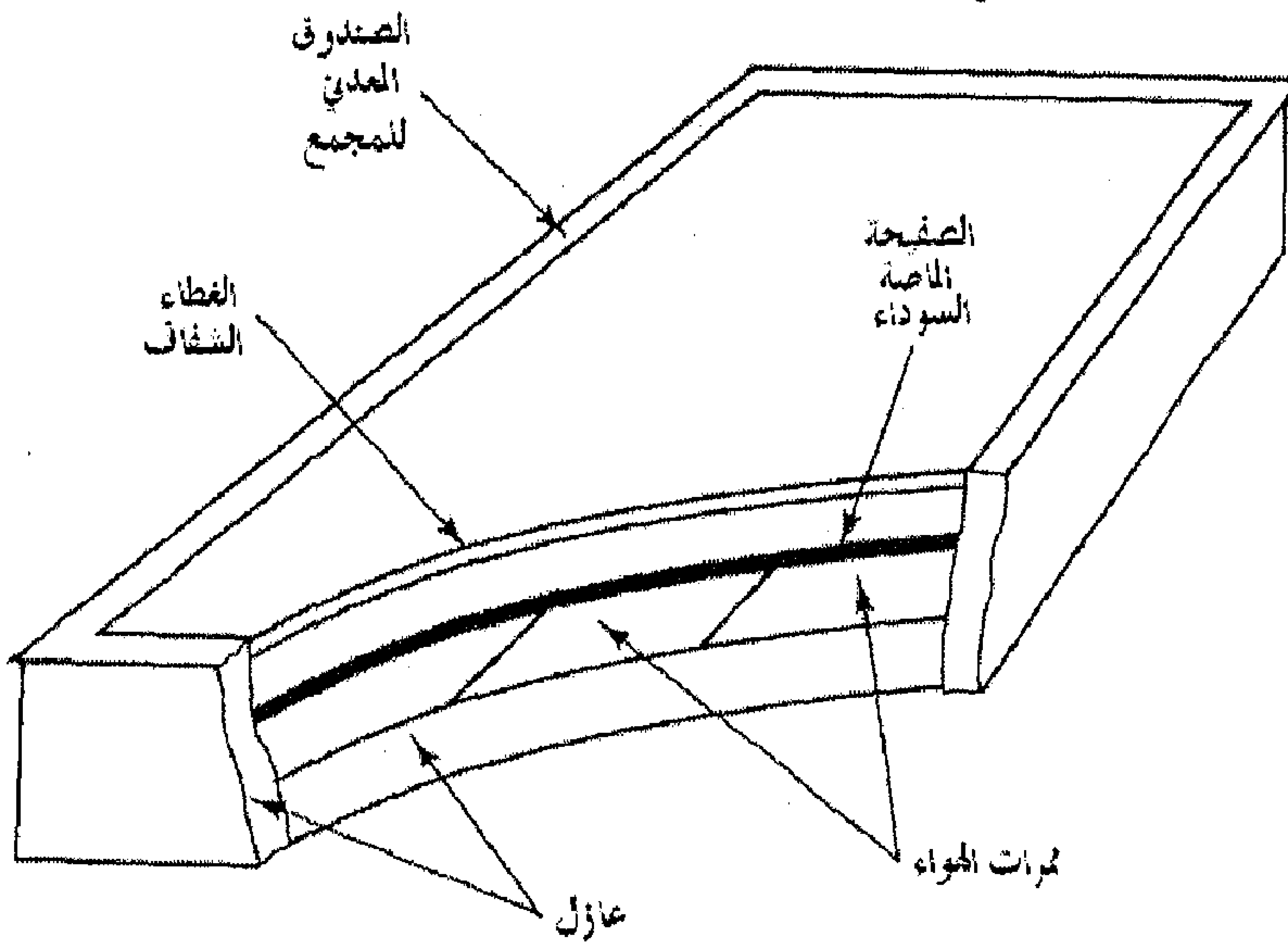
2.3 المجمعات الشمسية المستوية

تعتبر المجمعات الشمسية المستوية من أكثر المجمعات شيوعاً واستخداماً في التطبيقات المنخفضة درجات الحرارة، كالتطبيقات المنزلية مثلاً، وذلك لبساطة تصميمها، رخص ثمنها، لا تحتاج إلى صيانة كبيرة، وتعمل بكفاءة تصل في المعدل إلى 50%. كما يمتاز هذا النوع من المجمعات الشمسية عن الأنواع الأخرى، بأنه يقوم بتحويل كل من الأشعة المباشرة والمنتشرة بنفس الكفاءة. وتمثل هذه المجمعات أبسط أنواع المجمعات الشمسية، والتطبيقات الأساسية لهذه الوحدات يتمثل في تسخين المياه، تدفئة المباني، تكييف الهواء، وبعض العمليات الحرارية الصناعية الخفيفة.

يمثل الشكلان (1.3) و (2.3) نوعين من المجمعات الشمسية المستوية المائية والهوائية على التوالي.



شكل (1.3) مجمع شمسي مستوي لتسخين السوائل



شكل (2.3) مجمع شمسي مستوي لتسخين الهـواء

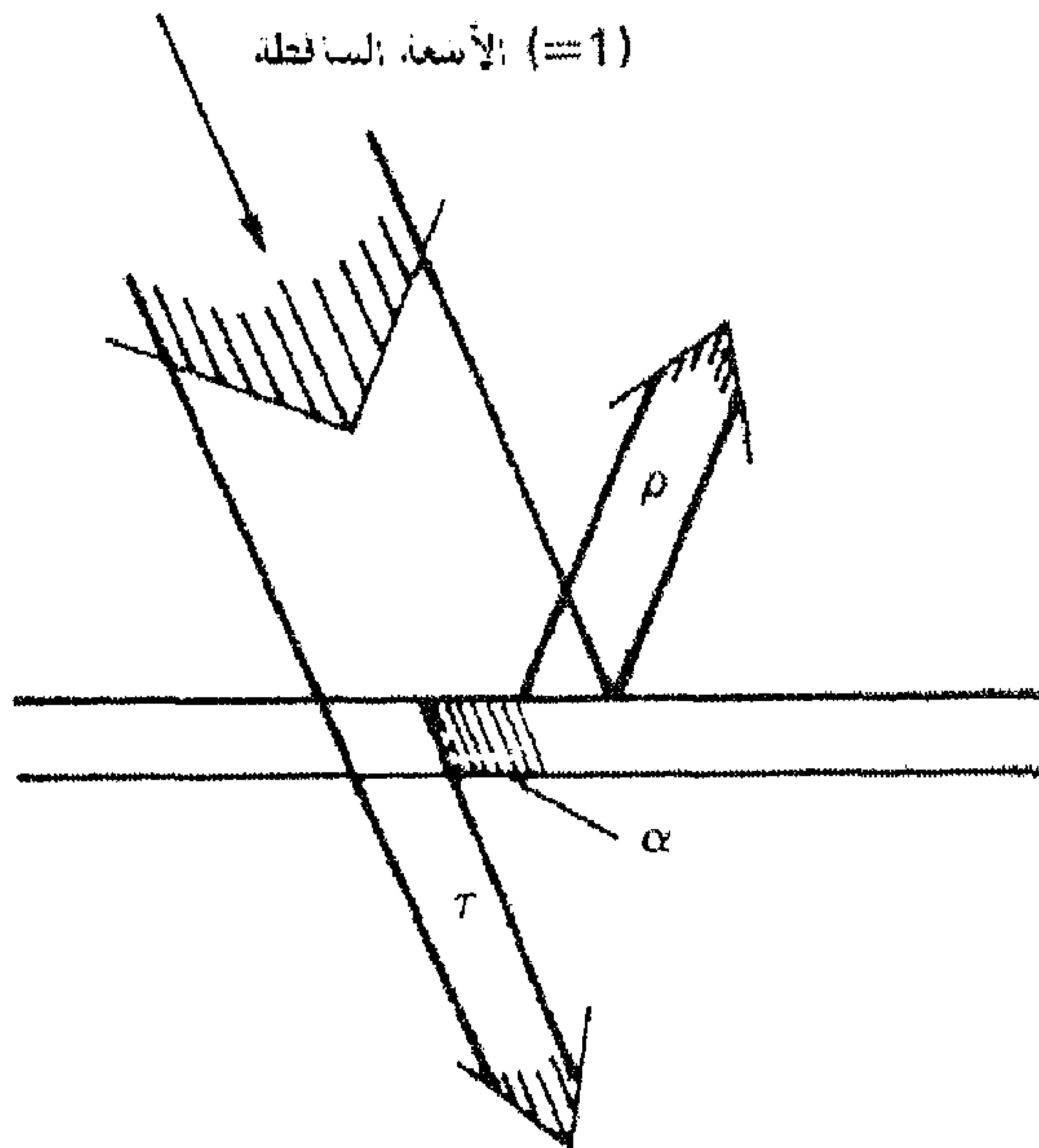
في هذا الجزء من الفصل سوف نتتبع سير الأشعة الشمسية من سقوطها على الغطاء الشفاف للمجمع حتى تمتص من قبل الصفيحة الماصة (فيما يسمى بالكفاءة البصرية)، فبعضها يبدد إلى المحيط الخارجي كطاقة مفقودة (وتسمى بالفقد الحراري)، والذي يتبقى يمرر إلى المائع العامل ليخرج بدرجة حرارة أعلى من تلك

التي دخل بها (وهذا يعرف بالكفاءة الحرارية). وحاصل ضرب الكفاءة البصرية في الكفاءة الحرارية يعطي الكفاءة الكلية للمجمع الشمسي.

3.3 الخواص البصرية للمجمعات الشمسية

1.3.3 الكفاءة البصرية للمجمع الشمسي

عند سقوط الأشعة الشمسية على الغطاء الشفاف للمجمع الشمسي، فإن جزءاً منها ينعكس، وآخر يُمتص والباقي ينفذ، كما هو مبين في الشكل (3.3). وكذلك الحال بالنسبة للصفيحة الماصة، فالجزء النافذ عبر الغطاء الشفاف يسقط عليها فتعكس جزءاً منه وتمتص الباقي. وتسمى هذه العملية بالكفاءة البصرية (الضوئية) للمجمع الشمسي. وتعتمد الكفاءة البصرية على المواصفات البصرية لعناصر المجمع الشمسي. ولذا وجب دراستها كلا على حدا.



شكل (3.3) **مخطط يمثل النفاذية** τ، **الامتصاصية** α، **والانعكاسية** ρ

في عملية تتبع مسار أشعة الشمس خلال سطح شفاف، فانه يجب تعريف زاويتين وهما: θ_1، زاوية السقوط و θ_2، زاوية الانكسار. وترتبط هاتين الزاويتان

ببعضهما بقانون سنيل Snell:

$$n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \tag{1.3}$$

حيث n_1، n_2 يمثلان معامل الانكسار للمادة 1، 2 على التوالي، n، يمثل معدل معامل الانكسار للوسطين اللذان يكونان سطح التلاقي. يبين الجدول (1.3) نماذج لقيم معدل معامل الانكسار n لبعض المواد المستخدمة في المجمعات الشمسية على أساس أن المادة الأولى لسطح التلاقي هواء.

جدول (1.3) معدل معامل الانكسار n في مدى الأشعة المنظورة لعدد من المواد (على أساس $n_1 = 1$ للهواء)

المادة		معامل الانكسار
هواء		1.000
زجاج		1.526
ماس	Diamond	2.42
ميلار	Polyethylene terephthalate (Mylar)	1.640
تيفلون	Polyfluoroethylene propylene (Teflon)	1.340
بليكسيغلاس	Polymethyl methacrylate (Plexiglas)	1.490
تيدلار	Polyvinyl fluoride (Tedlar)	1.450
كوارتز	Quartz	1.54
ماء ـ سائل		1.33
ماء ـ صلب		1.31

إن الإشعاع الـمُمتص بواسطة الوسط الشفاف يتناسب مع شدة الإشعاع وطول مسار الإشعاع المنكسر. بالإشارة إلى الشكل (4.3)، فانه:

$$-dI = K\,I\,dL$$

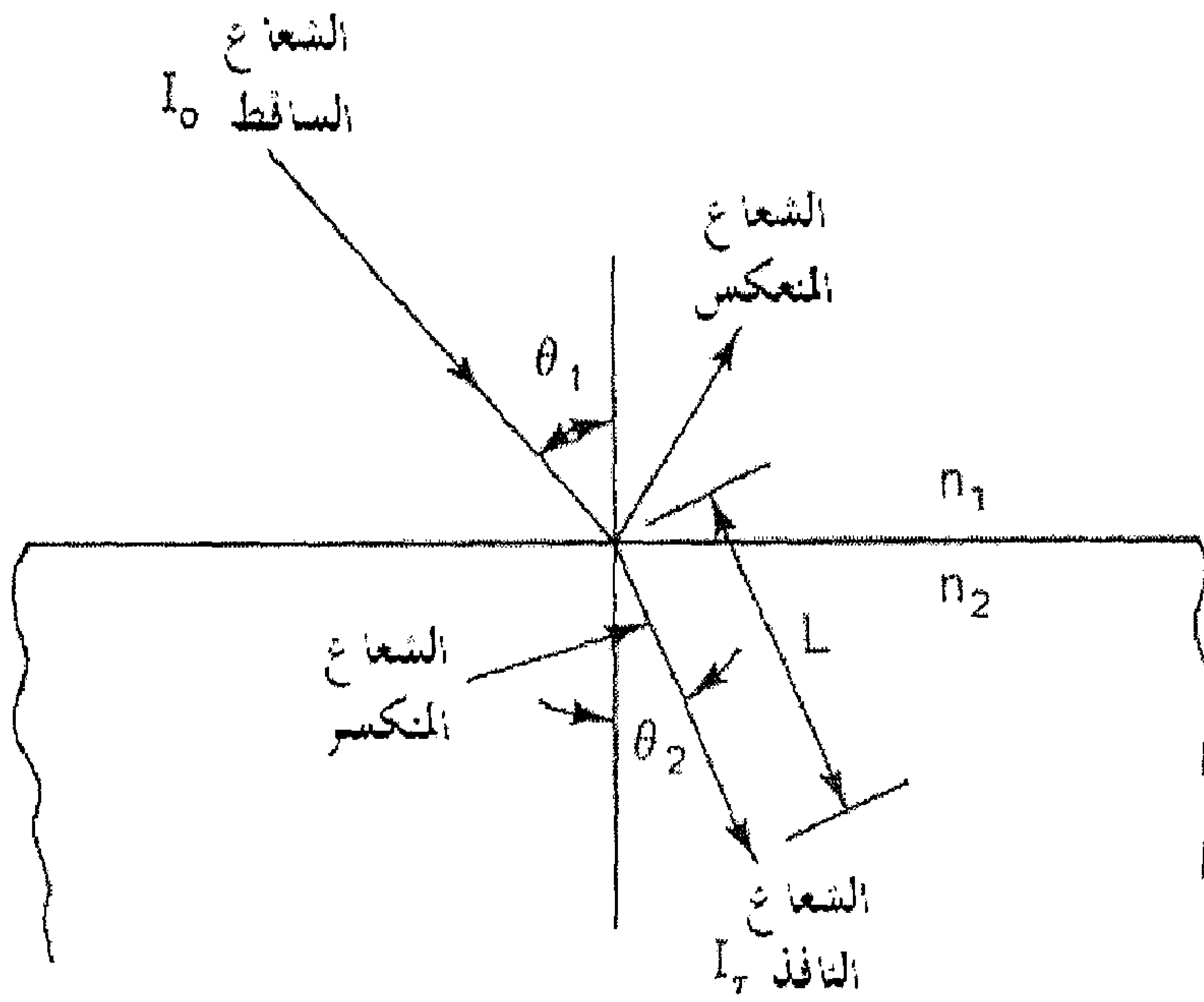
حيث K ثابت التناسب يسمى معامل التعتيم. بالتكامل على طول المسار ينتج:

$$\ln \frac{I_\tau}{I_o} = -K L$$

أو:

$$\tau' = \frac{I_\tau}{I_o} = e^{-K L} \qquad (2.3)$$

وهذا هو قانون بوقير Bouguer، حيث τ'، الجزء المتبقي من الشعاع الكلي بعد الامتصاص، ويعرض الجدول (2.3) قيم معامل التعتيم لبعض المواد.



شكل (4.3) زاوية السقوط والانكسار في وسطين بمعامل انكسار n_1, n_2

جدول (2.3) معامل التعتيم لبعض المواد الشفافة

المادة		معامل التعتيم K (cm^{-1})
زجاج		
أبيض (Fe_2O_3 <0.01%)		0.04 ~
نافذة		0.3 ~
ماص للحرارة		1.3 ـ 2.7
بوليثيلين	Polyethylene	1.65
ميلار	Polyethylene terephthalate (Mylar)	2.05
تيفلون	Polyfluoroethylene propylene (Teflon)	0.59
تيدلار	Polyvinyl fluoride (Tedlar)	1.4

يصبح من الضروري معالجة انعكاس الشعاع الضوئي عند سطحي تلاقي مختلفين (مثل هواء ـ زجاج) كمركبتين، وهما المركبة العمودية والمركبة الموازية لسطح السقوط. وتُرمز للمركبات العمودية بالرمز السفلي (⊥) و المركبات الموازية (||)، لسطح الانعكاس، على التوالي، كالتالي:

$$\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} \tag{3.3 أ}$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \tag{3.3 ب}$$

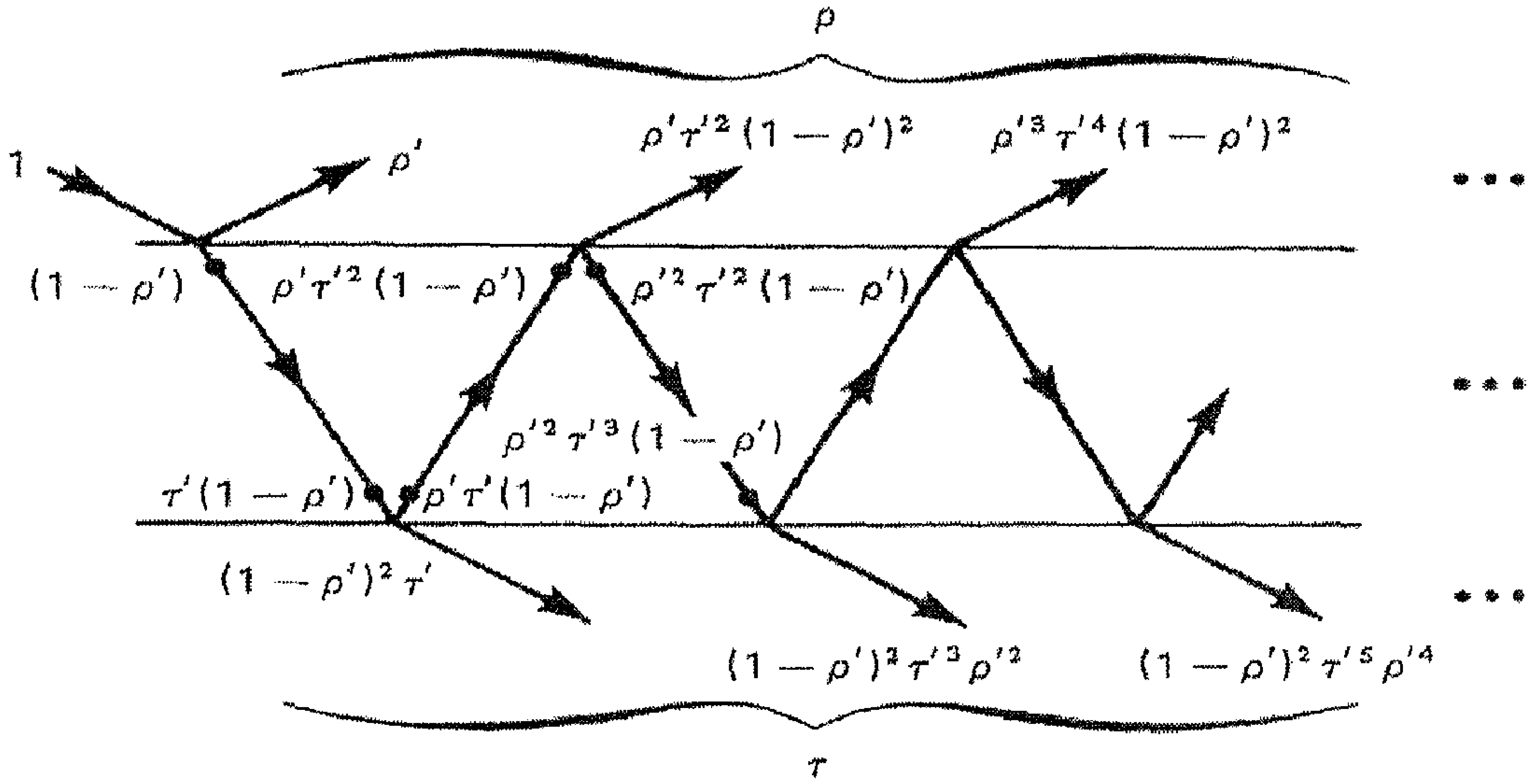
عند السقوط العمودي $\theta_1 = \theta_2 = 0$، فانه لا يوجد تأثير للحيود الضوئي، والمركبتان لسطح الانعكاس متساويتان، وبدلالة مؤشر الانكسار n تكونان كالتالي:

$$\rho_{\perp} = \rho_{\parallel} = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \tag{4.3}$$

من ناحية أخرى، عندما يكون الشعاع الساقط موازي لمستوى التلاقي، $\theta_1 = 90^\circ$، $\theta_2 < 90^\circ$، فان المركبتين مرة أخرى متساويتان:

$$\rho_{\perp}=\rho_{\parallel}=1$$

الشكل (5.3) يبين تتبع لحزمة أشعة شمسية تسقط على سطح زجاجي مفـرد. وهو يوضح المركبات العمودية والموازية لحيود الأشـعة السـاقطة، الرمـز ρ' يـدل على كل $\rho'_{\perp}$، $\rho'_{\parallel}$. بسبب تعاقب الانعكاسات الداخليـة، فـإن مركبـات الأشـعة المنعكسة، النافذة والممتصة تُعطى بمجموع هذه الانعكاسات المتوالية اللانهائية.



شكل (5.3) مخطط تتبع أشعة الشمس لوسط شفاف، مبيناً أجزاء الأشعة المنعكسة والنافذة عند اعتبار الانعكاسات الداخلية المتضاعفة

مجموع الانعكاسية $\rho(\rho',\tau')$ للغطاء الشفاف تُعطى بالعلاقة:

$$\rho(\rho',\tau')=\rho'+\frac{\rho'\tau'^2(1-\rho')^2}{1-\rho'^2\tau'^2} \qquad (5.3)$$

ومجموع النفاذية $\tau(\rho',\tau')$ تُعطى بالعلاقة:

$$\tau(\rho',\tau')=\frac{\tau'(1-\rho')^2}{1-\rho'^2\tau'^2} \qquad (6.3)$$

وبما أن $\alpha = 1-\rho-\tau$، فان مجموع الامتصاصية $\alpha(\rho',\tau')$، تكون على الصورة:

$$\alpha(\rho',\tau') = (1-\tau')\frac{1-\rho'}{1-\rho'\tau'} \qquad (7.3)$$

المعادلات من (5.3) إلى (7.3) تسمى بمعادلات ستوك Stoke. معادلات ستوك تطبق على مركبتي الأشعة الساقطة. ما عدا في حالة السقوط العمودي، $\rho'_{\perp}$ ، $\rho'_{\parallel}$ ليستا متساويتين وينتج اختلاف في المركبات العمودية والموازية للانعكاسية $\rho(\rho',\tau')$ والنفاذية $\tau(\rho',\tau')$. الانعكاسية ρ والنفاذية τ للغطاء الشفاف تعطى بمتوسط المركبتين العمودية والموازية، وبهذا:

$$\rho = \frac{1}{2}\left[\rho(\rho'_{\perp},\tau') + \rho(\rho'_{\parallel},\tau')\right] \qquad (8.3)$$

$$\tau = \frac{1}{2}\left[\tau(\rho'_{\perp},\tau') + \tau(\rho'_{\parallel},\tau')\right] \qquad (9.3)$$

حيث $\rho(\rho'_{\perp},\tau')$، تمثل ρ كدالة في $\rho'_{\perp}, \tau'$ وكذلك الأمر لباقي الحدود. نحصل على هذه الحدود من المعادلتين (5.3) و (6.3).

أمّا في حالة استخدام غطائين شفافين أو أكثر في المجمع الشمسي، فان طريقة تتبع الأشعة في الشكل (5.3) يمكن إعادتها لتحليل الخواص الكلية للانعكاس والنفاذية للغطاء الشفاف. لنظام بغطائين، وبغض النظر ما إذا كانا متشابهين أو مختلفين، فالرمز السفلي 1 يشير إلى الغطاء الخارجي، والرمز السفلي 2 يشير إلى الغطاء الداخلي، فان الانعكاسية والنفاذية الكلية للنظام تكون كالتالي:

$$\rho = \frac{1}{2}\left[\left(\rho_1 + \frac{\tau^{*}\tau_1\,\rho_2}{\tau_2}\right)_{\perp} + \left(\rho_1 + \frac{\tau^{*}\tau_1\,\rho_2}{\tau_2}\right)_{\parallel}\right] \qquad (10.3)$$

$$\tau = \frac{1}{2}\left(\tau^{*}_{\perp} + \tau^{*}_{\parallel}\right) \qquad (11.3)$$

حيث:

$$\tau^* = \frac{\tau_1 \tau_2}{1-\rho_1 \rho_2} \qquad (12.3)$$

المركبات العمودية والموازية لكل من τ, ρ لكل غطاء يمكن حسابها من المعادلات (5.3) و (6.3). وبإعادة تطبيق المعادلات (10.3) إلى (12.3) يمكن إيجاد النفاذية الانعكاسية لنظام يتضمن على أي عدد من الأغطية الشفافة. في مثل هذه الحالات، فان الرمز السفلي 1 يشير دائماً إلى الأغطية العليا جميعاً، والرمز 2 يشير إلى الغطاء السفلي الأخير. والشكل (6.3) يمثل النفاذية لعدد 1، 2، 3، 4 أغطية لعدة أنواع من الزجاج.

وبالتالي فان مقدار ما تمتصه الصفيحة الماصة من الطاقة الشمسية الساقطة على المجمع تكون:

$$H_a = H_t(\tau.\alpha) \qquad (13.3)$$

حيث: τ = النفاذية الكلية للأغطية الشفافة، من المعادلة (9.3) في حالة الغطاء الواحد

α = امتصاصية الصفيحة الماصة

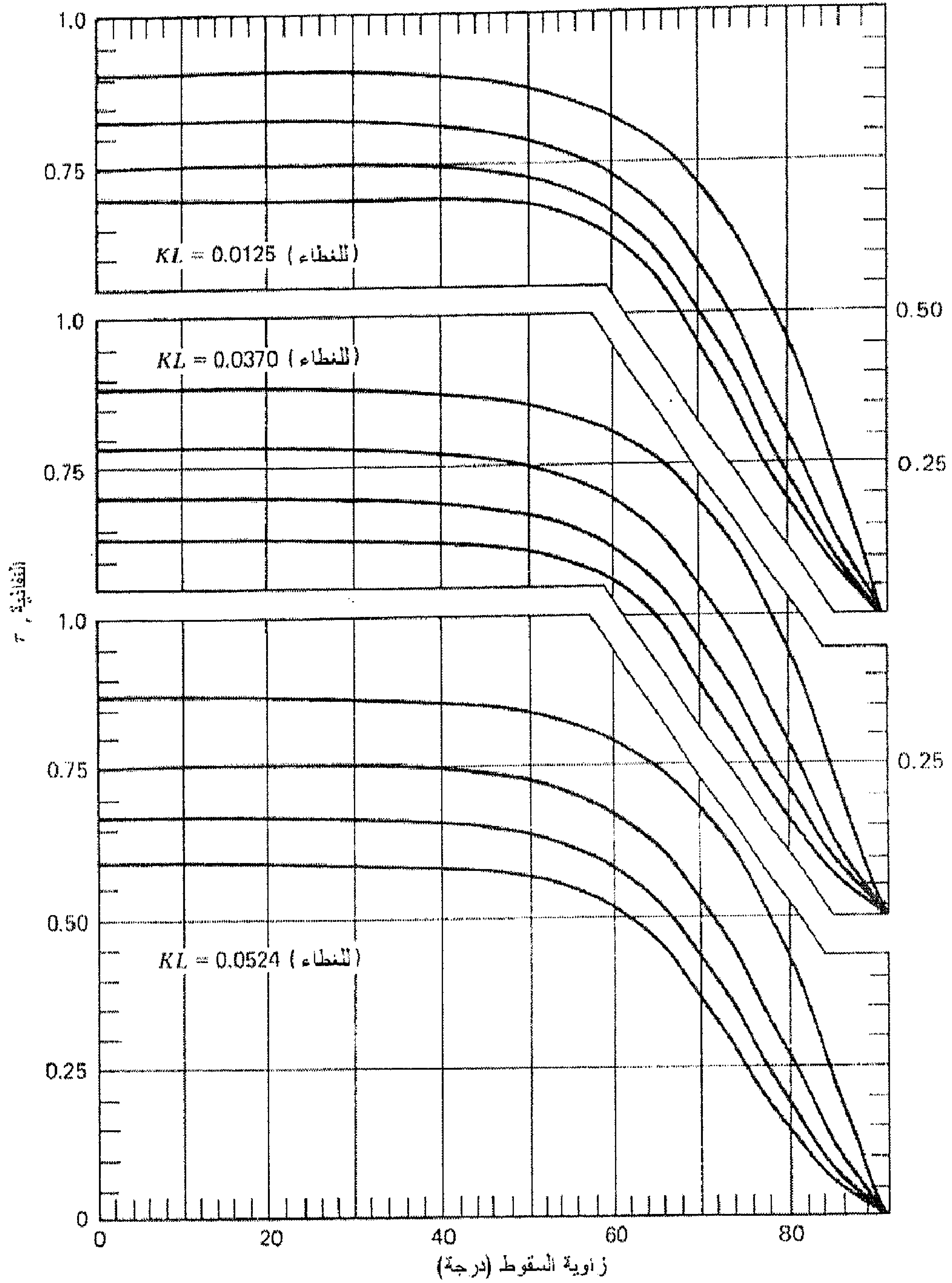
H_t = الأشعة الشمسية الكلية الساقطة على سطح المجمع

H_a = الأشعة الشمسية الكلية الممتصة من قبل الصفيحة الماصة

حاصل ضرب نفاذية الأغطية الشفافة في امتصاصية الصفيحة الماصة يُسمى بالكفاءة البصرية للمجمع الشمسي ويرمز لها $\eta_{optical}$، حيث:

$$\eta_{optical} = (\tau.\alpha) \qquad (14.3)$$

تعتبر الكفاءة البصرية أول فقد في كفاءة عمل المجمعات الشمسية بتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية مفيدة !



شكل (6.3) النفاذية (بالأخذ بعين الاعتبار الامتصاصية والانعكاسية) لعدد 1، 2، 3 و 4 أغطية شفافة (لكل شكل من أعلى إلى أسفل على التوالي) وبمعاملات انكسار مختلفة

مثال 1.3

مجمع شمسي بغطاء زجاجي مفرد بسمك $0.23\ cm$. معامل الانكسار للزجاج 1.526، ومعامل التعتيم $0.1\ cm^{-1}$. أحسب انعكاسية، نفاذية وامتصاصية لوح الزجاج عند زاوية سقوط تساوي $60°$.

الحل:

المعلومات المعطاة هي: $n = 1.526$، $K = 0.1\ cm^{-1}$، $\theta_1 = 60°$، ويُحسب طول مسار الشعاع من:

$L = \dfrac{0.23}{\cos\theta_2}\ cm$. من المعادلة (1.3) تُحسب زاوية الانكسار θ_2 كالتالي:

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{\sin\theta_1}{n}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{\sin 60°}{1.526}\right) = 34.6°$$

وبهذا فإن طول مسار الشعاع L:

$$L = \frac{0.23}{\cos 34.6°} = 0.279\ cm$$

باستخدام المعادلة (2.3) ينتج:

$$\tau' = e^{-KL} = e^{-(0.1)(0.279)} = 0.972$$

من المعادلة (3.3)، نتحصل على:

$$\rho'_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{\sin^2(60 - 34.6)}{\sin^2(60 + 34.6)} = 0.185$$

$$\rho'_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{\tan^2(60 - 34.6)}{\tan^2(60 + 34.6)} = 0.001$$

الانعكاسية $\rho(\rho',\tau')$ لكل مركبة تُحسب من المعادلة (5.3):

$$\rho\left(\rho'_{\perp},\tau'\right)=\rho'_{\perp}+\frac{\rho'_{\perp}\,\tau'^{2}\left(1-\rho'_{\perp}\right)^{2}}{1-\rho'^{2}_{\perp}\,\tau'^{2}}$$

$$=0.185+\frac{0.185(0.972)^{2}\left(1-0.185\right)^{2}}{1-(0.185)^{2}\,(0.972)^{2}}=0.305$$

$$\rho\left(\rho'_{\parallel},\tau'\right)=\rho'_{\parallel}+\frac{\rho'_{\parallel}\,\tau'^{2}\left(1-\rho'_{\parallel}\right)^{2}}{1-\rho'^{2}_{\parallel}\,\tau'^{2}}$$

$$=0.001+\frac{0.001(0.972)^{2}\left(1-0.001\right)^{2}}{1-(0.001)^{2}\,(0.972)^{2}}=0.002$$

من المعادلة (8.3) يمكن الحصول على متوسط الانعكاسية:

$$\rho=\frac{1}{2}\left[\rho\left(\rho'_{\perp},\tau'\right)+\rho\left(\rho'_{\parallel},\tau'\right)\right]=\frac{1}{2}(0.305+0.002)=0.154 \qquad \triangleleft$$

تُحسب النفاذية $\tau(\rho',\tau')$ لكل مركبة من المعادلة (6.3):

$$\tau\left(\rho'_{\perp},\tau'\right)=\frac{\tau'(1-\rho'_{\perp})^{2}}{1-\rho'^{2}_{\perp}\,\tau'^{2}}=\frac{0.972(1-0.185)^{2}}{1-(0.185)^{2}(0.972)^{2}}=0.667$$

$$\tau\left(\rho'_{\parallel},\tau'\right)=\frac{\tau'\left(1-\rho'_{\parallel}\right)^{2}}{1-\rho'^{2}_{\parallel}\,\tau'^{2}}=\frac{0.972(1-0.001)^{2}}{1-(0.001)^{2}(0.972)^{2}}=0.970$$

من المعادلة (9.3) يمكن الحصول على متوسط النفاذية:

$$\tau=\frac{1}{2}\left[\tau\left(\rho'_{\perp},\tau'\right)+\tau\left(\rho'_{\parallel},\tau'\right)\right]=\frac{1}{2}(0.667+0.970)=0.819 \qquad \triangleleft$$

أما متوسط الامتصاصية فيُحسب من المعادلة:

$$\alpha = 1 - \rho - \tau = 1 - 0.154 - 0.819 = 0.027$$ ◁

مثال 2.3

أعد المثال 1.3 لحالة السقوط العمودي.

الحل:

للسقوط العمودي تكون زاوية السقوط $\theta_1 = 0°$، وبالتالي فإن زاوية الانكسار أيضاً تساوي الصفر $\theta_2 = 0°$، عندها طول المسار يساوي السمك أي $L = 0.23\,cm$.

بتطبيق المعادلة (2.3) نحصل على:

$$\tau' = e^{-KL} = e^{-(0.1)(0.23)} = 0.977$$

ولأن زاوية السقوط عمودية فإنه لا وجود لتأثير الحيود الضوئي وبالتالي ومن المعادلة (4.3):

$$\rho_{\perp} = \rho_{\parallel} = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 = \left(\frac{1.526-1}{1.526+1}\right)^2 = 0.043$$

تُحسب انعكاسية اللوح الزجاجي من المعادلة (5.3):

$$\rho(\rho', \tau') = \rho' + \frac{\rho' \tau'^2 (1-\rho')^2}{1-\rho'^2 \tau'^2}$$

$$= 0.043 + \frac{0.043(0.977)^2 (1-0.043)^2}{1-(0.043)^2 (0.0977)^2} = 0.081$$ ◁

كما تُحسب نفاذية اللوح الزجاجي من المعادلة (6.3):

$$\tau(\rho', \tau') = \frac{\tau'(1-\rho')^2}{1-\rho'^2 \tau'^2} = \frac{0.977(1-0.043)^2}{1-(0.043)^2 (0.977)^2} = 0.896$$ ◁

وتُحسب امتصاصية اللوح الزجاجي من المعادلة (7.3)

$$\alpha(\rho',\tau')=(1-\tau')\frac{1-\rho'}{1-\rho'\tau'}=(1-0.977)\left(\frac{1-0.043}{1-0.043\times0.977}\right)=0.023$$

كما يمكن حساب قيمة الامتصاصية ببساطة من القانون:

$$\alpha=1-\rho-\tau=1-0.081-0.896=0.023$$ ◁

مثال 3.3

مجمع شمسي ثنائي الأغطية الزجاجية. الغطاء الخارجي عبارة عن لوح من الزجاج بسمك $0.23\,cm$، $n=1.526$، $K=0.1\,cm^{-1}$. أما الغطاء الداخلي فهو من لوح رقيق جداً من مادة البلاستيك Polymethyl methacrylate (الاسم التجاري هو Plexiglas)، وله $n=1.49$. أحسب النفاذية، الانعكاسية والامتصاصية لمجموعة الأغطية لزاوية سقوط تساوي $60°$.

الحل:

اللوح الزجاجي هو نفسه في المثال (1.3)، ومنه لدينا:

$$\rho_{\perp}=0.305 \qquad \rho_{\parallel}=0.002 \qquad \tau_{\perp}=0.667 \qquad \tau_{\parallel}=0.970$$

وحيث أن الغطاء الداخلي البلاستيكي رقيق جداً، فان الأشعة المتصة به يمكن إهمالها، وبالتالي فإن $\tau'\approx1$. عندما $\theta_1=60°$، فان زاوية الانكسار θ_2 تُحسب من المعادلة (1.3):

$$\theta_2=\sin^{-1}\left(\frac{\sin\theta_1}{n}\right)=\sin^{-1}\left(\frac{\sin 60°}{1.49}\right)=35.5°$$

من المعادلة (3.3) للوح البلاستيك:

$$\rho'_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{\sin^2(60 - 35.5)}{\sin^2(60 + 35.5)} = 0.174$$

$$\rho'_{\|} = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} = \frac{\tan^2(60 - 35.5)}{\tan^2(60 + 35.5)} = 0.002$$

وعندما يكون السمك رقيقاً جداً فإنه يمكن استخدام المعادلات التالية لحساب مركبات كل من الانعكاسية والنفاذية كالتالي:

$$\rho_{\perp} = \frac{2\rho'_{\perp}}{1 + \rho'_{\perp}} = \frac{2(0.174)}{1 + 0.174} = 0.292$$

$$\rho_{\|} = \frac{2\rho'_{\|}}{1 + \rho'_{\|}} = \frac{2(0.002)}{1 + 0.002} = 0.004$$

$$\tau_{\perp} = \frac{1 - \rho'_{\perp}}{1 + \rho'_{\perp}} = \frac{1 - 0.174}{1 + 0.174} = 0.704$$

$$\tau_{\|} = \frac{1 - \rho'_{\|}}{1 + \rho'_{\|}} = \frac{1 - 0.002}{1 + 0.002} = 0.996$$

بترميز الغطاء الزجاجي بالرمز السفلي 1 والغطاء البلاستيكي بالرمز السفلي 2، فإنه يمكن الآن حساب النفاذية للغطائين باستخدام المعادلات من (10.3) إلى (12.3):

$$\tau^*_{\perp} = \left(\frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2}\right)_{\perp} = \frac{0.667 \times 0.704}{1 - 0.305 \times 0.296} = 0.516$$

$$\tau^*_{\|} = \left(\frac{\tau_1 \tau_2}{1 - \rho_1 \rho_2}\right)_{\|} = \frac{0.970 \times 0.996}{1 - 0.002 \times 0.004} = 0.966$$

وبالتالي فإن نفاذية المجموعة تكون على الصورة التالية:

$$\tau = \frac{1}{2}\left(\tau_{\perp}^{*} + \tau_{\parallel}^{*}\right) = \frac{1}{2}(0.516 + 0.966) = 0.741 \qquad \triangleleft$$

أما انعكاسية المجموعة فتكون كالتالي:

$$\rho = \frac{1}{2}\left[\left(\rho_1 + \frac{\tau^{*}\,\tau_1\,\rho_2}{\tau_2}\right)_{\perp} + \left(\rho_1 + \frac{\tau^{*}\,\tau_1\,\rho_2}{\tau_2}\right)_{\parallel}\right]$$

$$\rho = \frac{1}{2}\left[\left(0.305 + \frac{0.516 \times 0.667 \times 0.296}{0.704}\right) + \left(0.002 + \frac{0.966 \times 0.970 \times 0.004}{0.996}\right)\right]$$

$$= 0.228 \qquad \triangleleft$$

وبالتالي فإن امتصاصية المجموعة تُحسب من القانون العام للبصريات:

$$\alpha = 1 - \tau - \rho = 1 - 0.741 - 0.228 = 0.031 \qquad \triangleleft$$

2.3.3 السطوح الانتقائية

يجب أن يكون للمجمعات الشمسية إمتصاصية عالية للأشعة الشمسية. كما يجب أن يكون، فقد الطاقة بالآليات المتعددة لانتقال الحرارة، والمتضمنة الإشعاع، الحمل والتوصيل الحراري من سطح الصفيحة الماصة، يجب أن يكون منخفضاً. ومن المفضل أن تكون انبعاثية سطح الصفيحة الماصة للموجات الطويلة أقل ما يمكن لتقليل الفواقد بالإشعاع. ويُسمى السطح المثالي، بالسطح النصف رمادي، ويمكن اعتباره رمادي في الطيف الشمسي (أي عند الأطوال الموجية الأقصر من 3.0 µm تقريباً)، كما يمكن اعتباره رمادياً أيضاً، ولكن بخواص أخرى في طيف الأشعة تحت الحمراء (أي عند الأطوال الموجية الأطول من 3.0 µm تقريباً). ولمثل هذه السطوح المثالية، تكون الانعكاسية قليلة جداً تحت الحد الفاصل للطول

الموجي. وللسطوح المعتمة $\alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda$، وبهذا فإن مدى α_λ يكون عالياً جداً. في الأطوال الموجية الأطول من λ_c تكون الانعكاسية قريباً من الواحد، وبما إن $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda$، وبهذا تكون الانبعاثية في هذا المدى صغيرة.

طورت العديد من طرق الطلاء المختلفة لتحسين الخصائص البصرية للصفائح الماصة في الجمعات الشمسية، والتي يُطلق عليها بعد التدخل التقني في تغيير خصائصها الطبيعية بالسطوح الانتقائية. مادة الطلاء التي لها امتصاصية عالية للأشعة الشمسية وانبعاثية منخفضة لموجات الأشعة الطويلة يمكن استخدامها كغطاء لسطح الصفيحة الماصة ذات الخصائص البصرية الرديئة. ويستخدم نوع (أو مركب من عدة أنواع) من أكاسيد المعادن ذو خصائص بصرية مفضلة لطلاء السطوح المعدنية. فعلى سبيل المثال: يُستخدم أكسيد النحاس كطلاء على صفيحة من الألمنيوم (Hottel, Unger, 1959)، أكسيد النحاس على النحاس (Close, 1962)، ويمكن استخدام طلاء كبريتيد نيكل ـ زنك لجلفنة الفولاذ.

الكروم الأسود هو الطلاء الأكثر استخداماً في الأسطح الانتقائية في الولايات المتحدة على سطح حديد أو نحاس. يتم الطلاء بواسطة الطلاء الكهربائي في حوض حامض الكروميك ومواد مساعدة أخرى. تم الحصول في المعمل على عينات بالخصائص البصرية التالية: الامتصاصية (α) 0.95 ـ 0.96، الانبعاثية (ε) 0.08 ـ 0.14، بينما كان معدل الخواص للعينات التي أنتجت لأسطح الجمعات الشمسية حوالي $\alpha = 0.94$، $\varepsilon = 0.08$ (Moore, 1976). الجدول (3.3) يعرض قيم امتصاصية الأشعة الشمسية وانبعاثيتها للموجات الطويلة لسطوح أنتجت لأغراض تجارية، بالإضافة إلى مدى درجات الحرارة العاملة وتأثير الرطوبة على السطح (Kreith, Kreider, 1978). للمزيد من المعلومات حول الخواص البصرية للعديد من أكاسيد المعادن المستخدمة في عمليات إنتاج السطوح الانتقائية للمجمعات الشمسية، يمكن مراجعة (McDonald, 1975).

جدول (3.3) الخواص البصرية لبعض السطوح الانتقائية

الطلاء	معدن الصفيحة الماصة	α	ε	أقصى درجة حرارة، $^{\circ}C$	تأثير الرطوبة
نيكل أسود على النيكل	فولاذ	0.95	0.07	> 290	متغير
كروم أسود على النيكل	فولاذ	0.95	0.09	> 430	لا تأثير
كروم أسود	فولاذ	0.91	0.07	> 430	صدأ تام
	نحاس	0.95	0.14	320	تأثير ضعيف
	فولاذ مجلفن	0.95	0.16	> 430	إزالة تامة
نحاس أسود	نحاس	0.88	0.15	320	إزالة تامة
أكسيد الحديد	فولاذ	0.85	0.08	430	تأثير ضعيف
أكسيد المنغنيز	ألمونيوم	0.70	0.08		
غطاء عضوي على أكسيد الحديد	فولاذ	0.90	0.16		تأثير ضعيف
غطاء عضوي على كروم أسود	فولاذ	0.94	0.20		تأثير ضعيف

4.3 الأداء الحراري للمجمعات الشمسية المستوية

1.4.3 مفهوم الكفاءة الحرارية والكفاءة الكلية للمجمعات الشمسية

الأداء الحراري للمجمع الشمسي يمكن استنباطه بواسطة الاتزان الحراري والذي يعين الجزء الداخل (الطاقة الشمسية) والجزء الخارج (الطاقة المفيدة) والجزء المفقود. لمجمع شمسي مستوي بمساحة سطحية A_c، يمكن كتابة معادلة الاتزان للحالة اللامستقرة كالتالي:

$$I_c\, A_c\, (\tau\, \alpha) = q_u + q_{loss} + \frac{q_{ec}}{d\,t} \qquad (15.3)$$

حيث: I_c = الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح المجمع الشمسي، W/m^2

$(\tau\alpha)$ = الكفاءة البصرية للمجمع: τ، نفاذية الغطاء الشفاف

α، امتصاصية الصفيحة الماصة

q_u = الطاقة المفيدة، وهي تتمثل في الحرارة المنتقلة من الصفيحة الماصة إلى المائع العامل، W

q_{loss} = معدل انتقال الحرارة بين الصفيحة الماصة والوسط المحيط، أو الفقد الحراري، W

q_{ec}/dt = معدل تغير الطاقة الداخلية لعناصر المجمع الشمسي، W

تمثل الكفاءة الحرارية اللحظية η_t، نسبة الطاقة المفيدة q_u إلى الطاقة الشمسية المتصة في الصفيحة الماصة H_a على وحدة المساحة السطحية للمجمع الشمسي A_c:

$$\eta_t = \frac{q_u}{A_c H_a} \qquad (16.3)$$

وبالتالي فإن الكفاءة الكلية للمجمع الشمسي η_c تكون حاصل ضرب الكفاءة البصرية في الكفاءة الحرارية، على الصورة التالية:

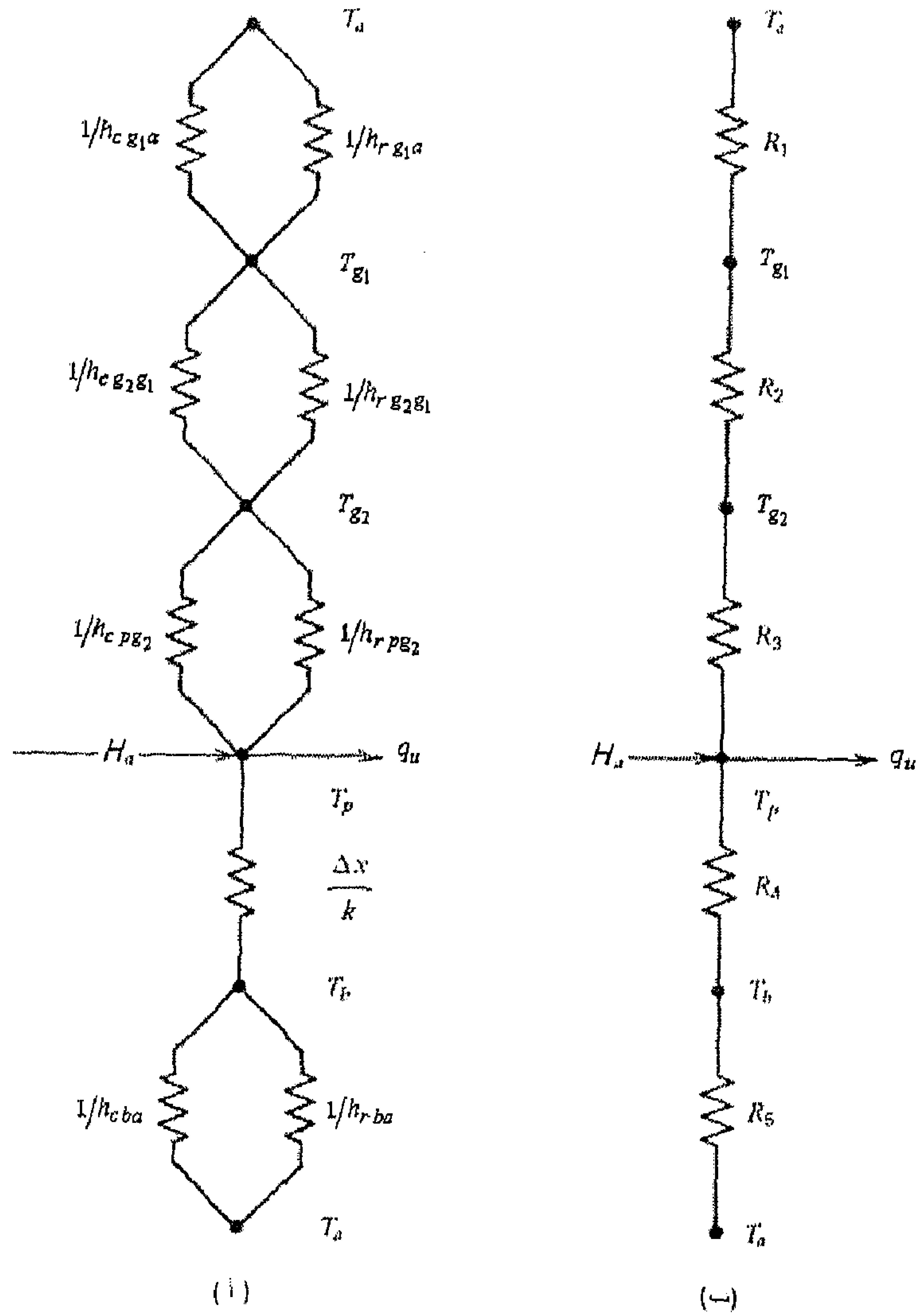
$$\eta_c = \eta_{optical}\ \eta_t = \frac{H_t\,(\tau.\alpha)}{H_t}\frac{q_u}{A_c H_a} = \frac{H_a}{H_t}\frac{q_u}{A_c H_a}$$

$$\eta_c = \frac{q_u}{A_c H_t} \qquad (17.3)$$

2.4.3 فواقد الطاقة الحرارية من المجمعات

عندما تستقبل الصفيحة الماصة كمية من الطاقة الشمسية، فان جلها ينتقل إلى الوسط العامل وتنقل بعيداً كطاقة مفيدة. ومهما يكن فان جزءاً من الطاقة يُفقد إلى الوسط المحيط بالطرق المختلفة لانتقال الحرارة. سيتناول هذا الجزء من الفصل تحليل الفواقد الحرارية، كبداية لدراسة الأداء الحراري للمجمعات الشمسية.

الشكل (7.3) يمثل شبكة المقاومات الحرارية لمجمع شمسي مسطح مزدوج الأغطية. لتبسيط التحليل نفرض الآتي:



شكل (7.3) شبكة المقاومات الحرارية لمجمع مستوي ثنائي الأغطية الشفافة: (أ) بدلالة مقاومات: التوصيل، الحمل والإشعاع، (ب) بدلالة المقاومات بين الأسطح

1. الأشعة الشمسية على المجمع متجانسة ومستقرة.
2. أداء المجمع في حالة استقرار.
3. الصفيحة الماصة والأغطية الشفافة عند درجات حرارة متجانسة.

4. فقدان الطاقة من أعلى المجمع خلال الأغطية الشفافة أحادي البعد.
5. فقدان الطاقة من أسفل المجمع خلال العازل السفلي أحادي البعد.
6. فقدان الطاقة من جوانب المجمع خلال العازل الجانبي أحادي البعد.
7. درجة حرارة المحيط حول كل المجمع متساوية.
8. الأغطية الشفافة لا تمتص الإشعاع الشمسي.
9. الخواص الحرارية ثابتة ولا تعتمد على درجة الحرارة.
10. ظل المجمع على الصفيحة الماصة مهمل.

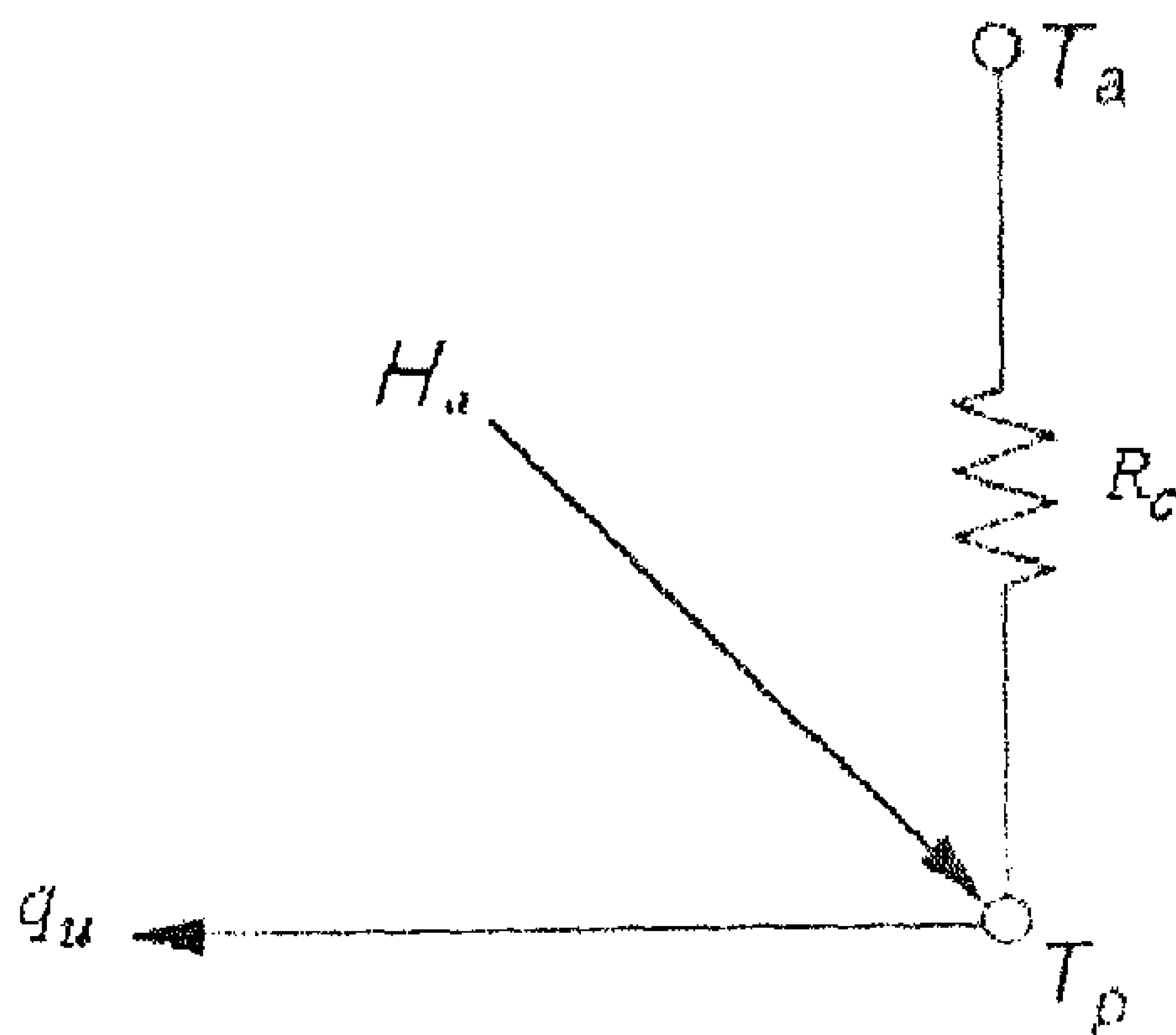
في المجمعات الشمسية يمكن حساب الاتزان الحراري بجمع المقاومات الحرارية المبينة في الشكل (7.3) إلى مقاومة مكافئة واحدة R_c المبينة في الشكل (8.3)، وبهذا فان الطاقة المفقودة من المجمع يمكن صياغتها بالصورة المبسطة:

$$q_{loss} = \frac{T_p - T_a}{R_c} = U_c\, A_c \left(T_p - T_a\right) \tag{18.3}$$

حيث: U_c = معامل الفقد الحراري الكلي، على أساس مساحة المجمع الشمسي A_c، W/m^2K

T_p = درجة حرارة الصفيحة الماصة

T_a = درجة حرارة الوسط المحيط



شكل (8.3) شبكة المقاومة الحرارية المكافئة لمجمع شمسي مستوي

ولتجميع المقاومات المتعددة المبينة في الشكل (7.3)، يتم في البداية تحليل الطاقة المفقودة خلال الأغطية الشفافة. لحالة الاستقرار، وانتقال الحرارة من الصفيحة الماصة إلى الغطاء الشفاف السفلي هو نفسه الفاقد من الغطاء السفلي إلى الغطاء العلوي، هو نفسه الفاقد من الغطاء العلوي إلى الهواء المحيط. انتقال الحرارة من الصفيحة الماصة عند T_p إلى الغطاء الشفاف السفلي عند T_{g_2}، بواسطة الحمل والإشعاع وبمعاملي حمل وإشعاع h_{cpg_2}، h_{rpg_2}، على التوالي. لمثل هذه الحالة يمكن صياغة الاتزان الحراري على الصورة التالية:

$$q_{top\,loss} = q_{absorber\,plate\,to\,lower\,cover}$$

$$= \left[h_{cpg_2} + h_{rpg_2}\right] A_c \left(T_p - T_{g_2}\right) \quad (19.3)$$

$$= \frac{T_p - T_{g_2}}{R_1} \quad (20.3)$$

$$R_1 = \frac{1}{\left(h_{cpg_2} + h_{rpg_2}\right) A_c} \quad (21.3)$$

حيث: h_{cpg_2} = معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الصفيحة الماصة والغطاء الشفاف السفلي،

h_{rpg_2} = معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الصفيحة الماصة والغطاء الشفاف السفلي،

$$h_{rpg_2} = \frac{\sigma\left(T_p^2 + T_{g_2}^2\right)\left(T_p + T_{g_2}\right)}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_{g_2} - 1}$$

حيث: ε_p، ε_{g_2}، انبعاثية الأشعة تحت الحمراء للصفيحة الماصة والغطاء الشفاف، على التوالي.

تباعاً، فانه يمكن كتابة معادلة الاتزان الحراري بين الغطائين السفلي والعلوي، كالتالي

$$q_{top\ loss} = q_{lower\ cover\ to\ top\ cover}$$

$$= \left[h_{cg_2g_1} + h_{rg_2g_1}\right] A_c \left(T_{g_2} - T_{g_1}\right) \tag{22.3}$$

$$R_2 = \frac{1}{\left(h_{cg_2g_1} + h_{rg_2g_1}\right) A_c} \tag{23.3}$$

حيث: $h_{cg_2g_1}$ = معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الغطاء الشفاف السفلي والعلوي

$h_{rg_2g_1}$ = معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الغطاء الشفاف السفلي والغطاء العلوي

$$h_{rg_2g_1} = \frac{\sigma\left(T_{g_2}^2 + T_{g_1}^2\right)\left(T_{g_2} + T_{g_1}\right)}{1/\varepsilon_{g_2} + 1/\varepsilon_{g_1} - 1} \tag{24.3}$$

حيث: ε_{g_1}، انبعاثية الأشعة تحت الحمراء للغطاء الشفاف العلوي.

والفاقد الحراري من الغطاء الشفاف العلوي إلى الهواء المحيط T_a بواسطة الحمل، وأيضاً هناك تبادل بالإشعاع مع السماء عند درجة حرارة T_{sky}، وبالتالي:

$$q_{top\ loss} = q_{top\ cover\ to\ ambient}$$

$$= \left[h_{cg_1a} + h_{rg_1a}\right] A_c \left(T_{g_1} - T_a\right) \tag{25.3}$$

$$R_3 = \frac{1}{\left(h_{cg_1a} + h_{rg_1a}\right) A_c} \tag{26.3}$$

حيث: h_{cg_1a} = معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الغطاء الشفاف العلوي والهواء المحيط

h_{rg_1a} = معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الغطاء الشفاف العلوي والسماء

$$h_{rg_1a} = \frac{\sigma \varepsilon_{g_1} \left(T_{g_1}^4 - T_{sky}^4\right)}{\left(T_{g_1} - T_a\right)} \qquad (27.3)$$

ولأن هذه المقاومات R_1, R_2, R_3 متصلة على التوالي، فان المحصلة تكون:

$$R_{top} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{U_{top}\, A_c} \qquad (28.3)$$

وبهذا تكون الطاقة المفقودة من الأسطح العلوية للمجمع الشمسي:

$$q_{top\ loss} = \frac{\left(T_p - T_a\right)}{R_{top}} = U_{top}\, A_c \left(T_p - T_a\right) \qquad (29.3)$$

حيث U_{top} معامل الفقد الحراري الكلي العلوي للمجمع، على أساس المساحة A_c.

وبنفس السياق يمكن الحصول على فقد الطاقة من الجهة السفلية للمجمع، كالتالي:

$$R_{bottom} = R_4 + R_5 = \frac{L_{ins}}{k_{ins}\, A_c} + \frac{1}{h_{cba}\, A_c} = \frac{1}{U_{bottom}\, A_c} \qquad (30.3)$$

حيث: L_{ins} = سمك العازل السفلي

k_{ins} = الموصلية الحرارية لمادة العازل السفلي

h_{cba} = معامل انتقال الحرارة بالحمل بين العازل السفلي والهواء المحيط

U_{bottom} = معامل الفقد الحراري الكلي من الجهة السفلية للمجمع، على أساس المساحة A_c.

وعادة ما تفرض R_5 مساوية للصفر، وبالتالي كل مقاومة سريان الحرارة تكون بالتوصيل نتيجة العزل (Duffie, Beckman, 1991)، وبهذا:

$$U_{bottom} = \frac{1}{R_4} = \frac{k_{ins}}{L_{ins}}$$

وبمعلومية R_{bottom} ، U_{bottom}، يمكن إيجاد الطاقة المفقودة من أسفل المجمع،

$$q_{bottom\,loss} = \frac{(T_p - T_a)}{R_{bottom}} = U_{bottom}\, A_c (T_p - T_a) \qquad (31.3)$$

يتبقى لنا أن نُعرف الفاقد الحراري من جوانب المجمع، والتي يمكن تقديرها كالتالي:

$$q_{edge\,loss} = \frac{(T_p - T_a)}{R_{edge}} = U'_{edge}\, A_{perimeter} (T_p - T_a) \qquad (32.3)$$

حيث: $A_{perimeter}$ = المساحة الجانبية للمجمع

U'_{edge} = معامل الفقد الحراري الكلي الجانبي، على أساس $A_{perimeter}$، (لأغـــراض التصـــميم يمكـــن اعتبـــار القيمـــة $U'_{edge} = 0.5\,\mathrm{W/m^2K}$).

المعادلة السابقة يمكن إعادة صياغتها لكي يصبح معامل الفقد الحراري الجـانبي عل أساس A_c، كالتالي:

$$U_{edge}\, A_c = U'_{edge}\, A_{perimeter}$$

وبهذا تكون الطاقة المفقودة من جوانب المجمع، على الصورة:

$$q_{edge\,loss} = \frac{(T_p - T_a)}{R_{edge}} = U_{edge}\, A_c (T_p - T_a) \qquad (33.3)$$

وبمعرفة المقاومات الثلاثة R_{top}، R_{bottom}، R_{edge}، كما هو مُعطى بالمعـادلات (28.3)، (30.3)، (32.3):

$$R_c = \left(\frac{1}{R_{top}} + \frac{1}{R_{bottom}} + \frac{1}{R_{edge}} \right)^{-1} \qquad (34.3)$$

$$U_c = U_{top} + U_{bottom} + U_{edge} \qquad (35.3)$$

حيث: R_c = المقاومة الكلية للفقد الحراري للمجمع

U_c = معامل الفقد الحراري الكلي للمجمع، على أساس A_c.

عملياً، وللمجمعات الشمسية الجيدة التصنيع، فان الفقد الحراري الجانبي يكون ضئيلاً مقارنة مع الفقد الحراري العلوي، ولأغراض التصميم يمكن إهماله. وبالتالي فإنه بالإمكان صياغة معادلة للطاقة المفيدة المكتسبة بدلالة معامل الفقد الحراري الكلي كالتالي:

$$q_u = A_c \left[H_a - U_c \left(T_p - T_a\right)\right] \tag{36.3}$$

المعادلات السابقة لتعيين معاملات الفقد الحراري، مخصصة فقط للنظام المبين في الشكل (1.3)، وفي حالة تغير النظام فانه يجب الحصول على معادلات أخرى، ولكن على نفس أسلوب التقريب السابق تماماً. وعليه فعلى القارئ أن يكون ملماً بمعادلات الاتزان، وأن يتدرب على كيفية الحصول على معاملات الفقد لعدة أنواع أخرى من المجمعات الشمسية المستوية.

أوجد (Hottel, Woertz, 1942) علاقة تجريبية لإيجاد U_{top}، ثم طورت بواسطة (Klein, 1975)، والتي يمكن استخدامها في الحسابات اليدوية أو على الحاسوب. هذه العلاقة تضبط منحنيات U_{top} لدرجات حرارة الصفيحة الماصة المتوسطة T_{pm} والتي تتراوح بين درجة حرارة الوسط المحيط T_a إلى $200^\circ C$ بنسبة خطأ $\pm 0.3\,\mathrm{W/m^2K}$.

$$U_{top} = \left\{ \frac{N}{\dfrac{C}{T_{pm}} \left[\dfrac{\left(T_{pm} - T_a\right)}{(N+f)} \right]^e} + \frac{1}{h_w} \right\}^{-1} + \frac{\sigma \left(T_{pm} + T_a\right)\left(T_{pm}^2 + T_a^2\right)}{A + B - N} \tag{37.3}$$

حيث: $A = \left(\varepsilon_p + 0.00591 N h_w\right)^{-1}$

$$B = \frac{2N + f - 1 + 0.133\,\varepsilon_p}{\varepsilon_g}$$

$$f = (1 + 0.089\,h_w - 0.1166\,h_w\,\varepsilon_p)(1 + 0.07866\,N)$$

$C = 520(1 - 0.000051\,s^2)$ عندما $0^\circ < s < 70^\circ$.

وفي حالة ما تكون $70^\circ < s < 90^\circ$ استعمل $s = 70^\circ$.

$$e = 0.430(1 - 100/T_{pm})$$

N = عدد أغطية الزجاج

s = زاوية ميل الجمع، (درجة)

ε_g = انبعاثية الزجاج

ε_p = انبعاثية الصفيحة الماصة

T_a = درجة حرارة الوسط المحيط، (K)

T_{pm} = درجة الحرارة المتوسطة للصفيحة الماصة، (K)

h_w = معامل انتقال الحرارة بواسطة الرياح، (W/m^2K)

مثال 4.3

أحسب معامل الفقد الحراري الكلي لجمع شمسي مستوي ثنائي الأغطية بالمعلومات التالية:

مساحة الجمع = $1m \times 2m$

زاوية ميل الجمع الشمسي، s = 45°

سمك الغطاء الزجاجي = $2.3mm$

سمك الصفيحة الماصة = $0.5mm$

المسافة بين الأغطية الزجاجية = $25mm$

المسافة بين الغطاء الزجاجي الداخلي والصفيحة الماصة = $25mm$

سمك الطبقة العازلة السفلية = $50mm$

الموصلية الحرارية لمادة العازل، $k_{ins} = 0.045W/m.K$

متوسط درجة حرارة الصفيحة الماصة، $T_p = 100^\circ C = 373K$

درجة حرارة الهواء الجوي، T_a = درجة حرارة السماء، $T_{sky} = 10^\circ C = 283K$

انبعاثية الصفيحة الماصة، $\varepsilon_p = 0.10$

انبعاثية الغطاء الزجاجي، $\varepsilon_{g_1} = \varepsilon_{g_2} = 0.88$

معامل انتقال الحرارة عن طريق الرياح = $10W/m^2.K$

الحل:

بما أن درجات حرارة الأغطية الزجاجية T_{g1} ، T_{g_2} مجهولة، فان الحل باستخدام طريقة (التجربة والخطأ) يكون ضرورياً. في البداية أفرض قيم درجات الحرارة T_{g1} ، T_{g_2}. ثم جد معاملات انتقال الحرارة بالإشعاع h_{rpg_2}، $h_{rg_2g_1}$، h_{rg_1a}، والتي تُحسب من المعادلات (21.3)، (24.3)، (27.3)، على التوالي. معاملات انتقال الحرارة بالحمل $h_{cg_2g_1}$، h_{cpg_2}، تُحسب من المعادلات المناسبة من أي مصدر في علم انتقال الحرارة والتي سيورد ذكرها في هذا المثال. أما قيمة معامل انتقال الحرارة بواسطة الرياح $h_{cg_1a} = h_w$ فهي معطاة، وتساوي $10W/m^2.K$. وفي النهاية، تأكد من أن القيم المفروضة T_{g1} ، T_{g_2} تحقق المعادلتين التاليتين، واللاتان تم الحصول عليهما من تجميع المعادلات (19.3)، (22.3)، (25.3):

$$\left(h_{cpg_2} + h_{rpg_2}\right)\left(T_p - T_{g_2}\right) = \left(h_{cg_2g_1} + h_{rg_2g_1}\right)\left(T_{g_2} - T_{g_1}\right)$$
$$= \left(h_{cg_1a} + h_{rg_1a}\right)\left(T_{g_1} - T_a\right)$$

وإلا فيجب فرض قيم جديدة لكل من T_{g1} ، T_{g_2}، وبإعادة الإجراء مرة بعد أخرى حتى يتم الحصول على القيم الصحيحة.

في هــذا المثــال ســنورد أخــر محاولــة. بفــرض أن $T_{g1} = 25^\circ C = 298K$، $T_{g2} = 51^\circ C = 324K$. ومن المعادلة (21.3) نحصل على:

$$h_{rpg_2} = \frac{\sigma\left(T_p^2 + T_{g_2}^2\right)\left(T_p + T_{g_2}\right)}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_{g_2} - 1}$$

$$h_{rpg_2} = \frac{\left(5.67\times10^{-8}\right)(373+324)\left(373^2+324^2\right)}{(1/0.10)+(1/0.88)-1} = 0.95\ W/m^2.K$$

ومن المعادلة (24.3) نحصل على:

$$h_{rg_2g_1} = \frac{\sigma\left(T_{g_2}^2 + T_{g_1}^2\right)\left(T_{g_2} + T_{g_1}\right)}{1/\varepsilon_{g_2} + 1/\varepsilon_{g_1} - 1}$$

$$h_{rg_2g_1} = \frac{\left(5.67\times10^{-8}\right)(324+298)\left(324^2+298^2\right)}{(1/0.88)+(1/0.88)-1} = 5.37\ W/m^2.K$$

من المعادلة (27.3)، وبملاحظة أن $T_a = T_{sky}$، فإنه:

$$h_{rg_1a} = \sigma\varepsilon_{g_1}\left(T_{g_1} + T_{sky}\right)\left(T_{g_1}^2 + T_{sky}^2\right)$$

$$h_{rg_1a} = 0.88\left(5.67\times10^{-8}\right)(298+283)\left(298^2+283^2\right) = 4.90\ W/m^2.K$$

من جداول الخصائص الحرارية للهواء، نحصل علـى الخـواص التاليـة: ν، Pr، k والمتحصل عليها عند درجات الحرارة التالية:

عند متوسط درجة حرارة الصفيحة الماصة ولوح الزجاج الداخلي:

$$\frac{1}{2}\left(T_p + T_{g_2}\right) = \frac{1}{2}(373+324) = 348.5\ K$$

$$\nu = 20.6\times10^{-6}\ m^2/s \quad , \quad \Pr = 0.697 \quad , \quad k = 0.0299\ W/m.K$$

وعند متوسط درجة حرارة اللوحين الزجاجيين الداخلي والخارجي:

$$\frac{1}{2}\left(T_{g_2}+T_{g_1}\right)=\frac{1}{2}(324+298)=311\ K$$

$$\nu=16.8\times10^{-6}\,m^2/s \quad , \quad \Pr=0.706 \quad , \quad k=0.0271W/m.K$$

ثم تُحسب معاملات انتقال الحرارة بالحمل على الطريقة التالية:

لمعامل الحمل بين الصفيحة الماصة ولوح الزجاج الداخلي h_{cpg_2}:

$$\mathrm{Ra}=\frac{2\,g\,L^3\,\Pr}{\nu^2}\left(\frac{T_p-T_{g_2}}{T_p+T_{g_2}}\right)$$

$$\mathrm{Ra}=\frac{2(9.8)(0.025)^3\,(0.697)}{\left(20.6\times10^{-6}\right)^2}\left(\frac{373-324}{373+324}\right)=3.54\times10^4$$

$$h_{cpg_2}=\frac{k}{L}\left\{1+1.44\left[1-\frac{1708}{\mathrm{Ra}\cos\ s}\right]^{(+)}\left[1-\frac{(\sin 1.8s)^{1.6}(1708)}{\mathrm{Ra}\cos\ s}\right]+\left[\left(\frac{\mathrm{Ra}\cos\ s}{5830}\right)^{1/3}-1\right]\right\}$$

$$h_{cpg_2}=\frac{0.0299}{0.025}\left\{1+1.44\left[1-\frac{1708}{\left(3.54\times10^4\right)\cos\ 45}\right]\left[1-\frac{(\sin 1.8\times45)^{1.6}(1708)}{\left(3.54\times10^4\right)\cos\ 45}\right]+\left[\left(\frac{\left(3.54\times10^4\right)\cos 45}{5830}\right)^{1/3}-1\right]\right\}=3.44\,W/m^2.K$$

لمعامل الحمل بين اللوحين الزجاجيين الداخلي والخارجي $h_{cg_2g_1}$:

$$\text{Ra} = \frac{2\,\text{g}\,\text{L}^3\,\text{Pr}}{\nu^2}\left(\frac{T_{g_2} - T_{g_1}}{T_{g_2} + T_{g_1}}\right)$$

$$\text{Ra} = \frac{2(9.8)(0.025)^3\,(0.706)}{\left(16.8\times10^{-6}\right)^2}\left(\frac{324-298}{324+298}\right) = 3.20\times10^4$$

$$h_{cg_2g_1} = \frac{0.0271}{0.025}\left\{1+1.44\left[1-\frac{1708}{\left(3.20\times10^4\right)\cos\ 45}\right]\left[1-\frac{(\sin 1.8\times45)^{1.6}(1708)}{\left(3.20\times10^4\right)\cos\ 45}\right]\right.$$

$$\left.+\left[\left(\frac{\left(3.20\times10^4\right)\cos 45}{5830}\right)^{1/3}-1\right]\right\} = 3.04\ W/m^2.K$$

للتأكد من صحة القيم المفروضة T_{g1} ، T_{g_2}، فإنه يجب الآن تعويض معاملات انتقال الحرارة المحسوبة في المعادلات (19.3)، (22.3)، (25.3). النتائج المتحصل عليها كالتالي:

$$\frac{q_{toploss}}{A_c} = \left(h_{cpg_2} + h_{rpg_2}\right)\left(T_p - T_{g_2}\right)$$

$$= (3.44 + 0.95)(373 - 324) = 215\ W/m^2$$

$$\frac{q_{toploss}}{A_c} = \left(h_{cg_2g_1} + h_{rg_2g_1}\right)\left(T_{g_2} - T_{g_1}\right)$$

$$= (3.04 + 5.37)(324 - 298) = 219\ W/m^2$$

$$\frac{q_{toploss}}{A_c} = \left(h_{cg_1a} + h_{rg_1a}\right)\left(T_{g_1} - T_a\right)$$

$$= (10 + 4.90)(298 - 283) = 224\ W/m^2$$

وكما هو واضح فإن الحلول الثلاثة غير متطابقة تماماً، فإنه يجب إجراء محاولة أخرى، وذلك بفرض مجموعة قيم مغايرة لدرجات الحرارة T_{g1} ، T_{g_2}. عملية المحاولة متعبة باستخدام آلة حاسبة صغيرة، ولكنها تكون سهلة وسريعة باستخدام الحاسوب. وبالتالي وبفرض أن $T_{g1} = 298K$ ، $T_{g2} = 324K$ هي درجات حرارة صحيحة ولنتابع حل المسألة.

من المعادلة (28.3) بالإضافة إلى المعادلات (21.3)، (23.3)، (26.3)، فإنه يمكن إيجاد معامل الفقد الحراري العلوي الكلي كالتالي:

$$U_{top} = [A_c(R_1 + R_2 + R_3)]^{-1}$$

$$= \left(\frac{1}{h_{cpg_2} + h_{rpg_2}} + \frac{1}{h_{cg_2g_1} + h_{rg_2g_1}} + \frac{1}{h_{cg_1a} + h_{rg_1a}}\right)^{-1}$$

$$= \left(\frac{1}{3.44 + 0.95} + \frac{1}{3.04 + 5.37} + \frac{1}{10 + 4.90}\right)^{-1} = 2.42\ W/m^2.K$$

بفرض أن قيمة R_5 صغيرة بالمقارنة مع قيمة R_4 ، فإن معامل الفقد الحراري السفلي الكلي يمكن تعيينه من المعادلة (30.3) كالتالي

$$U_{bottom} = \frac{1}{A_c(R_4 + R_5)} \approx \frac{1}{A_cR_4} = \frac{k_{ins}}{L_{ins}} = \frac{0.045}{0.050} = 0.90\ W/m^2.K$$

مساحة الجمع الشمسي $1m\times2m$، وسمك مكوناته كالتالي على التوالي: $(2.3+25+2.3+25+0.5+50)=105\ mm=0.105\ m$، باستخدام المعادلات (32.3)، (33.3)، وبفرض أن قيمة $U'_{edge}=0.5W/m^2K$، فإنه:

$$U_{edge}=U'_{edge}\left(\frac{A_{perimeter}}{A_c}\right)=0.5\left(\frac{6\times0.105}{1\times2}\right)=0.16\,W/m^2.K$$

وأخيراً، فإن معامل الفقد الحراري الكلي للمجمع الشمسي يُحسب من المعادلة (35.3):

$$U_c=U_{top}+U_{bottom}+U_{edge}=2.42+0.90+0.16=3.48\,W/m^2.K \qquad \triangleleft$$

مثال 5.3

أعد المثال 4.3 وذلك باستخدام المعادلة (37.3).

الحل:

المعلومات المعطاة هي: $N=2$، $T_p=373\,K$، $T_a=283\,K$، $\varepsilon_p=0.10$، $\varepsilon_g=0.88$، $s=45°$، $h_w=10\,W/m^2.K$، وأيضاً يمكن إيجاد الثوابت للمعادلة (37.3):

$$A=(0.1+0.00591\times2\times10)^{-1}=4.583$$

$$f=(1+0.089\times10-0.1166\times10\times0.1)(1+0.07866\times2)=2.052$$

$$B=\frac{2\times2+2.052-1+0.133\times0.1}{0.88}=5.756$$

$$C=520\left(1-0.000051\times(45)^2\right)=466.297$$

$$e=0.430\left(1-\frac{100}{373}\right)=0.315$$

$$U_{top}=\left\{\frac{N}{\frac{C}{T_{pm}}\left[\frac{(T_{pm}-T_a)}{(N+f)}\right]^{e}}+\frac{1}{h_w}\right\}^{-1}+\frac{\sigma(T_{pm}+T_a)(T_{pm}^2+T_a^2)}{A+B-N}$$

$$U_{top}=\left\{\frac{2}{\frac{466.297}{373}\left[\frac{(373-283)}{(2+2.052)}\right]^{0.315}}+\frac{1}{10}\right\}^{-1}+\frac{5.67\times10^{-8}(373+283)(373^2+283^2)}{4.583+5.756-2}$$

$$=1.425+0.978=2.223\ W/m^2.K$$

وبالتالي فإن معامل الفقد الحراري الكلي للمجمع الشمسي يكون:

$$U_c=2.223+0.90+0.16=3.283\ W/m^2.K$$ ◁

5.3 التحليل الحراري للمجمعات الشمسية المستوية

1.5.3 توزيع درجات الحرارة في أنابيب المجمع الشمسي للموائع

من المرغوب فيه معرفة توزيع درجات الحرارة داخل المجمع الشمسي المائي المبين في الشكل (9.3). الشكل (10.3أ) يبين المنطقة بين الأنابيب. والجزء الكبير من الطاقة الشمسية الممتصة بواسطة الصفيحة الماصة يجب أن تصل إلى منطقة الأنابيب. وبهذا فان منطقة المنتصف بين الأنابيب هي الأكثر سخونة من تلك القريبة من الأنابيب. الطاقة المنتقلة إلى المائع ستقوم بتسخين المائع، مسببة تدرج في

درجات حرارته في اتجاه سريان المائع. وبما أنه، وفي أي منطقة في المجمع فان المستوى العام لدرجة الحرارة يتحكم به المستوى الموضعي لدرجة حرارة المائع، ويمكن التكهن بالحالة كما هو مبين في الشكل (10.3ب). عند أي موضع y ، التوزيع العام لدرجات الحرارة في اتجاه x سيكون كما هو مبين في الشكل (10.3جـ) وعند أي موضع x ، فان توزيع درجات الحرارة في اتجاه y سيبدو كما في الشكل (10.3د).

إن توزيع درجات الحرارة في الأنابيب يمكن استنتاجه، لو فرضنا مؤقتاً، أن تدرج درجات الحرارة في اتجاه السريان مهمل. باعتبار قطعة من الصفيحة والأنبوب المبين في شكل (11.3 أ). المسافة بين الأنابيب w ، قطر الأنبوب D ، وسمك الصفيحة t . وبسبب الموصلية الجيدة لمادة الصفيحة فان تدرج درجة الحرارة خلال الصفيحة يعتبر مهملاً. وستُفرض درجة حرارة الصفيحة فوق منطقة اللحام مساوية لتلك عند القاعدة T_b . المنطقة بين خط المنتصف الذي يفصل الأنابيب وقاعدتها يمكن اعتبارها مسألة زعنفة تقليدية.

الزعنفة المبينة في الشكل (11.3 ب)، بطول L . حجم التحكم بعرض δx وبطول الوحدة في اتجاه السريان. بتطبيق شروط اتزان الطاقة على حجم التحكم نحصل على:

$$H_a\,\delta x-U_c\,\delta x(T-T_a)+\left(-k\,t\frac{dT}{dx}\right)-\left[-k\,t\frac{d}{dx}\left(T+\frac{dT}{dx}\delta x\right)\right]=0$$

أو:

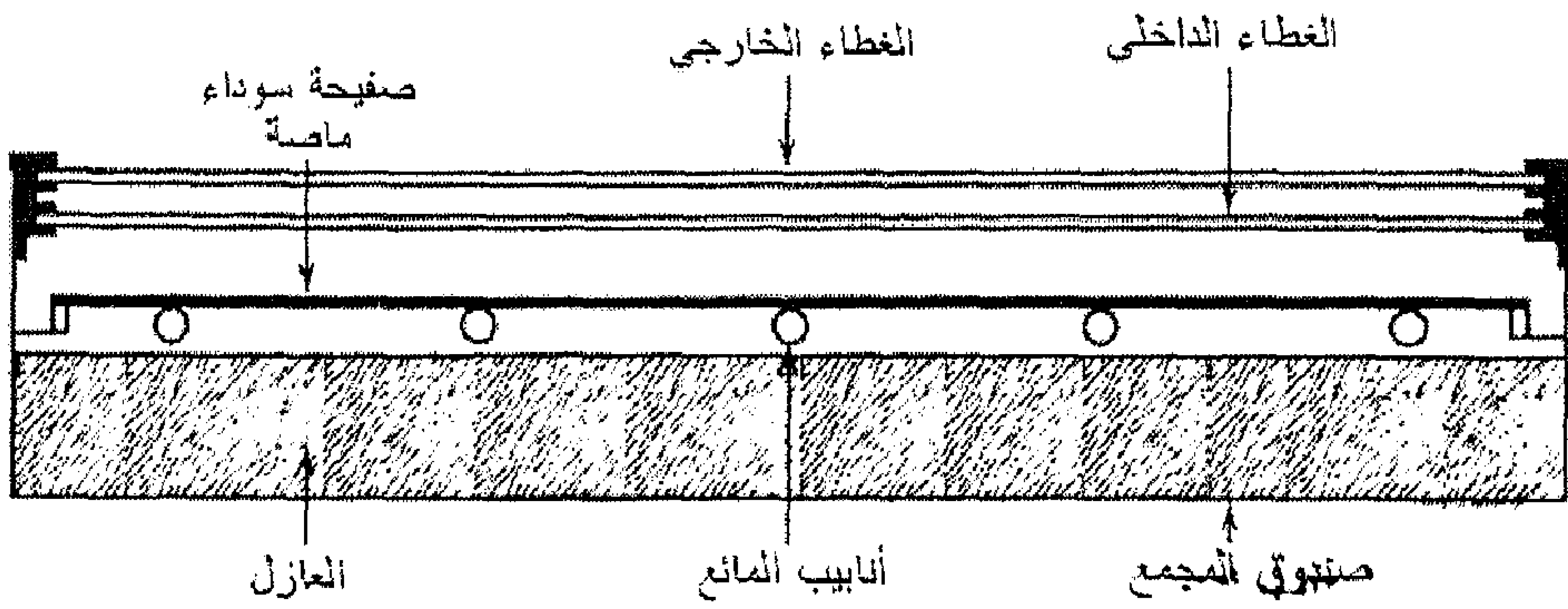
$$H_a-U_c(T-T_a)+k\,t\frac{d^2T}{dx^2}=0$$

حيث H_a ، تمثل الطاقة الشمسية الممتصة من قبل الصفيحة الماصة وتعرف بالمعادلة ($H_a=H_t(\tau.\alpha)$). بإعادة ترتيب المعادلة السابقة، نحصل على المعادلة التفاضلية ذات المرتبة الثانية التالية:

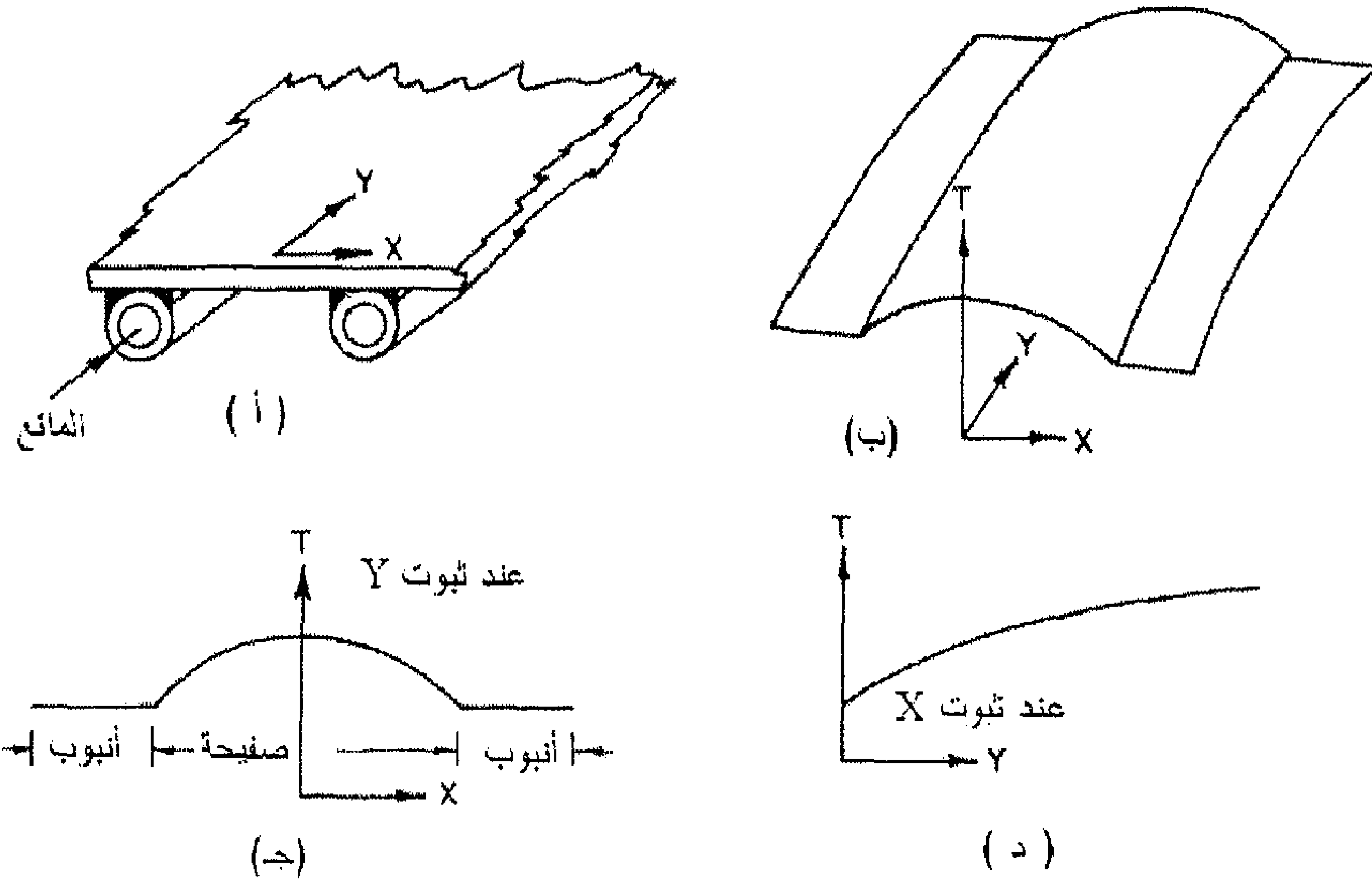
$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{U_c}{kt}\left(T - T_a - \frac{H_a}{U_c}\right) \quad (38.3)$$

وهي بحاجة إلى شرطين حدودين لحلها وهما: التماثل عند خط المنتصف ودرجة حرارة القاعدة معلومة:

$$\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=0} = 0 \quad , \qquad T\big|_{x=L} = T_b \quad (39.3)$$



شكل (9.3) مقطع عرضي لمجمع شمسي مسطح مائي ثنائي الأغطية الشفافة



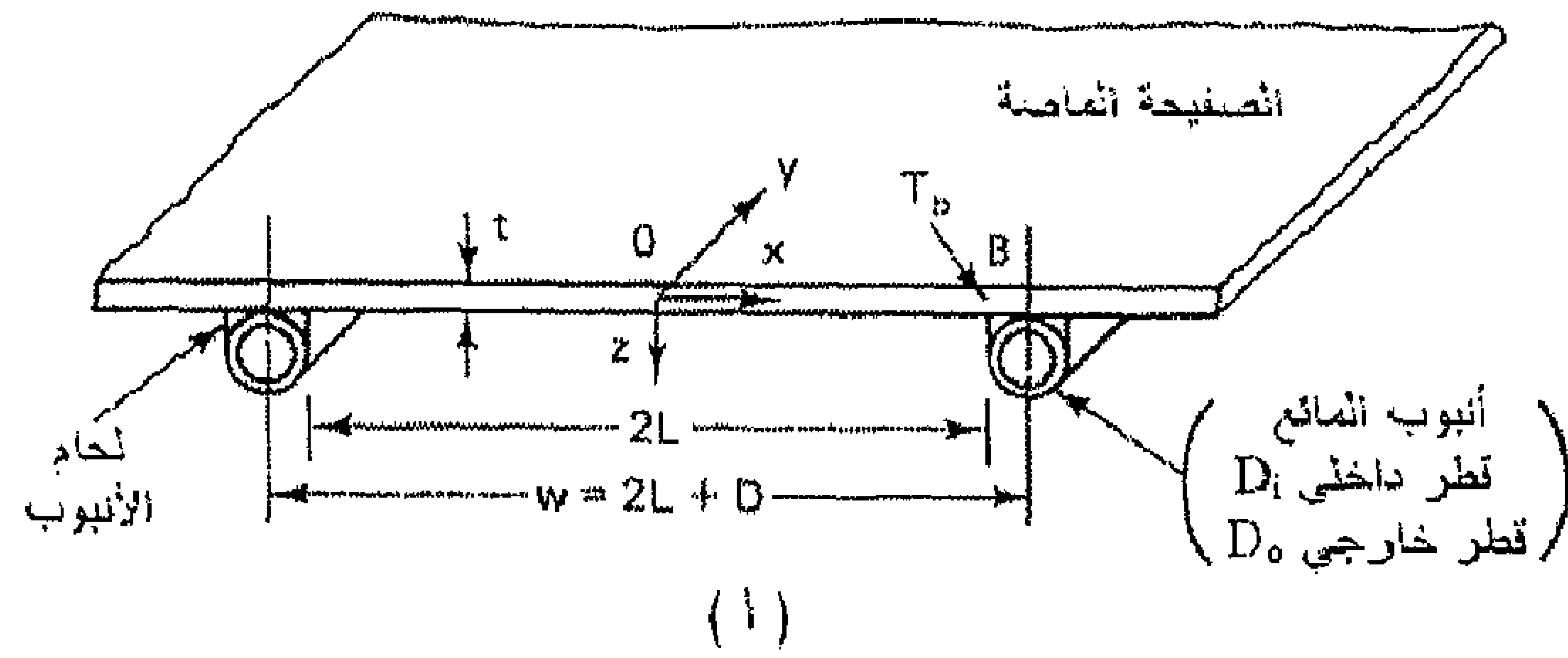
شكل (10.3) توزيع درجات الحرارة على الصفيحة الماصة لمجمع شمسي مائي

لتسهيل التعامل مع المعادلة التفاضلية، يمكن فرض:

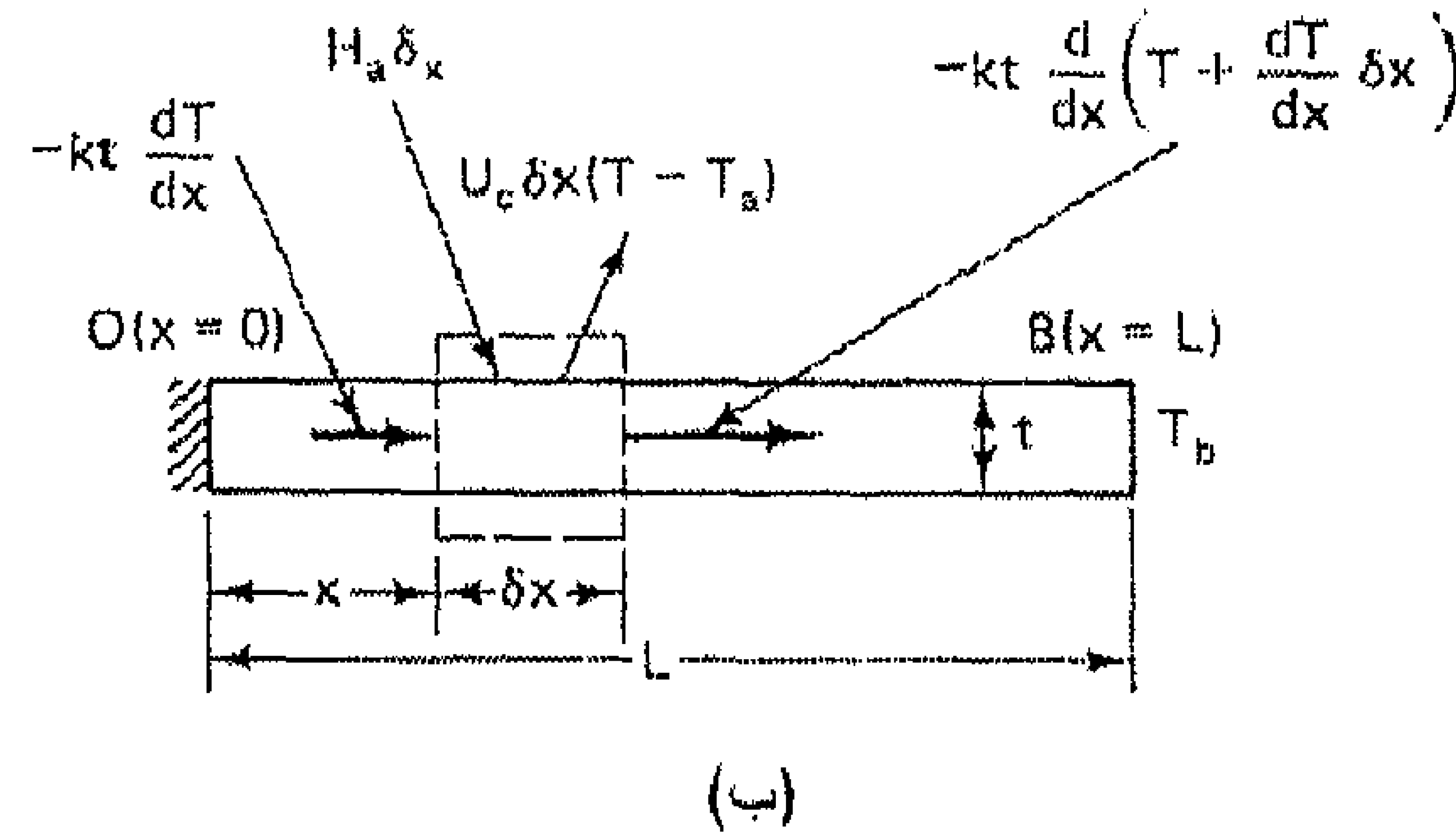
$$m^2 = U_c / k t \quad , \qquad \Psi = T - T_a - H_a / U_c$$

وبهذا، فإن المعادلة (38.3) تصبح على الصورة التالية:

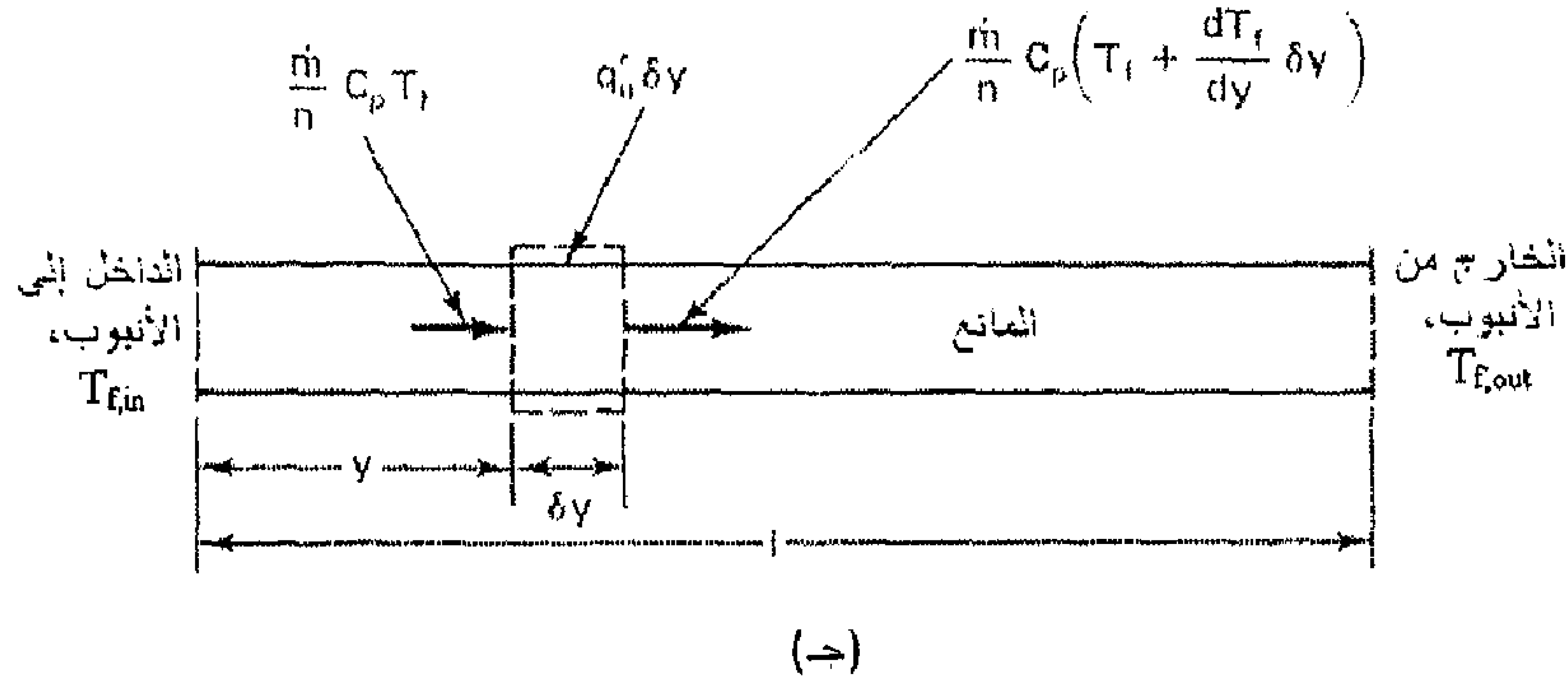
$$\frac{d^2\Psi}{d x^2} - m^2 \Psi = 0 \tag{40.3}$$



(أ)



(ب)



(جـ)

شكل (11.3) الاتزان الحراري لزعنفة الأنبوب في المجمع الشمسي المائي

والتي سنطبق عليها الشروط الحدودية التالية:

$$\left.\frac{d\Psi}{dx}\right|_{x=0}=0 \quad , \qquad \Psi|_{x=L}=T_b-T_a-\frac{H_a}{U_c} \tag{41.3}$$

والتي لها حل عام على الصورة التالية:

$$\Psi=C_1\sinh mx+C_2\cosh mx \tag{42.3}$$

ثابتا التكامل C_2, C_1، نتحصل عليهما بالتعويض في الشروط الحدودية في معادلة الحل العام، والنتيجة تكون:

$$\frac{T-T_a-H_a/U_c}{T_b-T_a-H_a/U_c}=\frac{\cosh mx}{\cosh mL} \tag{43.3}$$

هذه المعادلة تمثل توزيع درجات الحرارة في اتجاه x عند أي موضع y.

معدل انتقال الحرارة إلى منطقة الأنبوب على وحدة الطول في اتجاه y يمكن إيجادها بتقييم التوصيل الحراري عند قاعدة الزعنفة على أساس العلاقة التالية:

$$q_{fin}=-kt\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=L}=-ktm\left(\frac{T_b-T_a-H_a/U_c}{\cosh mL}\right)\sinh mx|_{x=L}$$
$$=\frac{1}{m}[H_a-U_c(T_b-T_a)]\tanh mL$$

وبما أن الأنابيب مرتبطة بالزعانف من جهتين، فان الطاقة الكلية المستقبلة في منطقة الأنابيب تكون:

$$q_{fin}=2L[H_a-U_c(T_b-T_a)]\left(\frac{\tanh mL}{mL}\right) \tag{44.3}$$
$$=2LF[H_a-U_c(T_b-T_a)]$$

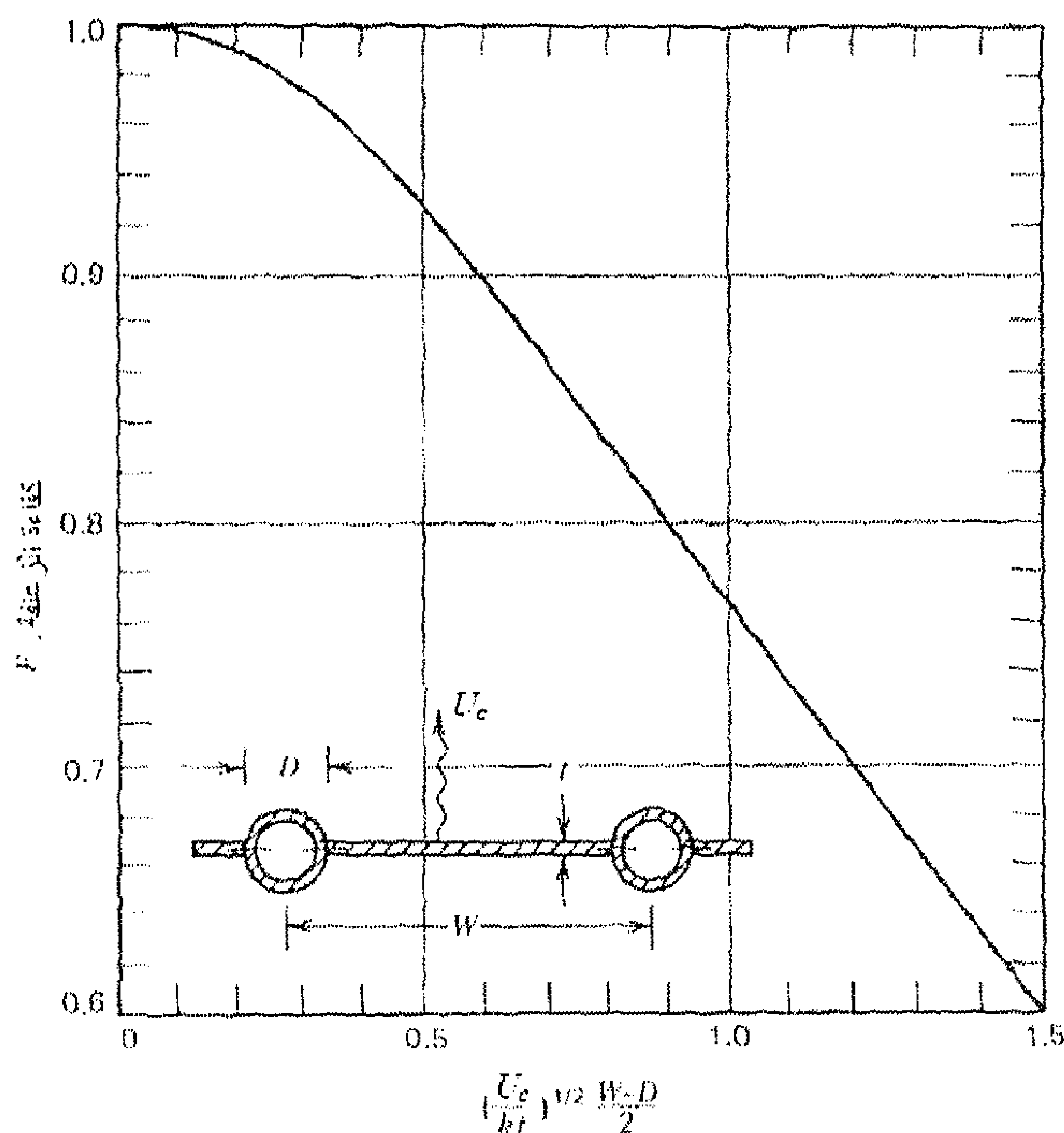
حيث:

$$F=\left(\frac{\tanh mL}{mL}\right) \tag{45.3}$$

والتي تسمى بكفاءة الزعنفة، للزعنفة المستوية، المستطيلة المقطع. الشكل (12.3) يبين كفاءة زعنفة أنبوب لمجمع شمسي مستوي مائي.

بالإضافة إلى المنتقلة خلال الزعانف، فان منطقة الأنابيب تجمع الطاقة أيضاً من سطحها العلوي كالتالي:

$$q_{tube} = D\left[H_a - U_c\left(T_b - T_a\right)\right] \qquad (46.3)$$



شكل (12.3) كفاءة الزعنفة لأنبوب وصفيحة المجمع الشمسي

حيث D هو قطر الأنبوب الخارجي، وبهذا تكون الطاقة المفيدة لوحدة الطول في اتجاه سريان المائع:

$$q'_u = q_{tube} + q_{fin} = \left(2LF + D\right)\left[H_a - U_c\left(T_b - T_a\right)\right] \qquad (47.3)$$

هذه الطاقة سوف تنتقل إلى المائع المتحرك في الأنابيب. بدلالة المقاومات الحرارية، يمكن تمثيل المعادلة على الصورة التالية:

$$q'_u = \frac{T_b - T_f}{(1/C_B) + (1/h_i \pi D_i)} \quad (48.3)$$

حيث: T_f = درجة حرارة المائع في الأنبوب عند الموضع الذي تكون فيه درجة حرارة الصفيحة الماصة T_b

h_{ci} = معامل انتقال الحرارة بالحمل الداخلي

D_i = القطر الداخلي للأنبوب

C_B = موصلية اللحام، $C_B = \frac{k_B\, w_B}{t_B}$

الرموز k_B، w_B، t_B تشير إلى الموصلية الحرارية، العرض ومتوسط سمك مادة اللحام، على التوالي. وغالباً ما تكون قيمة C_B أكبر من $35\, W/m\, K$.

ويمكن حذف T_b من المعادلة (48.3) والحصول على صيغة للطاقة المفيدة بدلالة مقاسات أخرى معلومة، متغيرات فيزيائية، ودرجة حرارة المائع الموضعية. بحل المعادلة (47.3) لإيجاد T_b، وبالتعويض في المعادلة (48.3)، وصياغة النتيجة للحصول على الطاقة المفيدة كالتالي:

$$q'_u = w F' \left[H_a - U_c \left(T_f - T_a \right) \right] \quad (49.3)$$

حيث:

$$F' = \frac{1/U_c}{w \left[\frac{1}{U_c (2 L F + D)} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{h_i \pi D_i} \right]} \quad (50.3)$$

تُسمى F' بمعامل كفاءة المجمع. فيزيائياً، هذا المعامل يمثل نسبة المقاومة الحرارية بين الصفيحة الماصة والهواء الجوي إلى المقاومة الحرارية بين المائع والهواء الجوي. إن نموذجاً لقيم المتغيرات اللازمة لتعيين معامل كفاءة مجمع شمسي مستوي معطى في الجدول (4.3)، (Kreith, Kreider, 1978).

معادلة (49.3) تعطي الطاقة المفيدة على وحدة طول أنبوب المائع والتي في النهاية تنتقل إلى المائع.

جدول (4.3) قيم المتغيرات اللازمة لحساب معامل الكفاءة لمجمع شمسي مستوي للمعادلة (50.3)

	$U_c, \left(W/m^2K\right)$
2 أغطية زجاجية	4
1 غطاء زجاجي	8
	$k\,t, (W/K)$
صفيحة ماصة من النحاس، سماكة 1 mm	0.4
صفيحة ماصة من الفولاذ، سماكة 1 mm	0.005
	$h_i, \left(W/m^2K\right)$
ماء، حمل قسري، جريان رقائقي	300
ماء، حمل قسري، جريان مضطرب	1500
هواء، حمل قسري، جريان مضطرب	100

ترتفع درجة حرارة دخول المائع إلى المجمع T_{fi} خلال سريان المائع في المجمع حتى تصل إلى درجة حرارة الخروج من المجمع T_{fo}. بالإشارة إلى الشكل (11.3ج)، ويمكن صياغة اتزان الطاقة للمائع خلال أنبوب واحد بطول Δy كما يلي:

$$\left(\frac{\dot{m}}{n}\right)c_p T_f\bigg|_y - \left(\frac{\dot{m}}{n}\right)c_p T_f\bigg|_{y+\Delta y} + \Delta y\, q'_u = 0 \qquad (51.3)$$

حيث $\dot{m}$، معدل التدفق الكلي للمائع خلال المجمع، n، عدد أنابيب المجمع على التوازي. بالقسمة على Δy، وبايجاد النهاية عندما Δy تؤول إلى الصفر، وبالتعويض في المعادلة (49.3)، نحصل على:

$$\dot{m} c_p \frac{d T_f}{d y} - n w F' \left[H_a - U_c \left(T_f - T_a\right)\right] = 0 \tag{52.3}$$

بفرض أن F', U_c، لا تعتمدان على الموضع، (Dunkle, Cooper, 1975)، فان الحل لدرجة حرارة المائع عند أي موضع y يكون:

$$\frac{T_f - T_a - H_a / U_c}{T_{fi} - T_a - H_a / U_c} = \exp\left(\frac{-U_c n w F' y}{\dot{m} c_p}\right) \tag{53.3}$$

لجمع شمسي بطول L في اتجاه السريان، فإن درجة حرارة خروج المائع من المجمع T_{fo}، نحصل عليها بتعويض L بدلاً من y في المعادلة (53.3). المقدار nwL، يمثل مساحة المجمع الشمسي A_c:

$$\frac{T_{fo} - T_a - H_a / U_c}{T_{fi} - T_a - H_a / U_c} = \exp\left(\frac{-A_c U_c F'}{\dot{m} c_p}\right) \tag{54.3}$$

من المناسب تعريف مقدار نسبة الطاقة المفيدة المكتسبة الحقيقية من المجمع إلى الطاقة المفيدة في حالة ما إذا كان كل سطح الصفيحة الماصة للمجمع عند درجة حرارة دخول المائع إلى المجمع. هذه الكمية تُسمى معامل الإزاحة الحرارية F_R. ويمكن تمثله رياضياً كالتالي:

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p \left(T_{fo} - T_{fi}\right)}{A_c \left[H_a - U_c \left(T_{fi} - T_a\right)\right]} \tag{55.3}$$

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_c U_c}\left[\frac{\left(T_{fo} - T_{fi}\right)}{\frac{H_a}{U_c} - \left(T_{fi} - T_a\right)}\right]$$

$$= \frac{\dot{m} c_p}{A_c U_c}\left[\frac{\left(T_{fo} - T_a - \frac{H_a}{U_c}\right) - \left(T_{fi} - T_a - \frac{H_a}{U_c}\right)}{\frac{H_a}{U_c} - \left(T_{fi} - T_a\right)}\right]$$

$$= \frac{\dot{m} c_p}{A_c U_c}\left[1 - \frac{\frac{H_a}{U_c} - \left(T_{fo} - T_a\right)}{\frac{H_a}{U_c} - \left(T_{fi} - T_a\right)}\right]$$

والتي يمكن إعادة صياغتها كالتالي:

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_c U_c}\left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_c F'}{\dot{m} c_p}\right)\right] \qquad (56.3)$$

لتمثيل المعادلة (56.3) بيانياً، من المناسب تعريف معامل سريان المجمع F''، وهو النسبة بين F_R إلى F'. وبهذا:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} c_p}{A_c U_c F'}\left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_c F'}{\dot{m} c_p}\right)\right] \qquad (57.3)$$

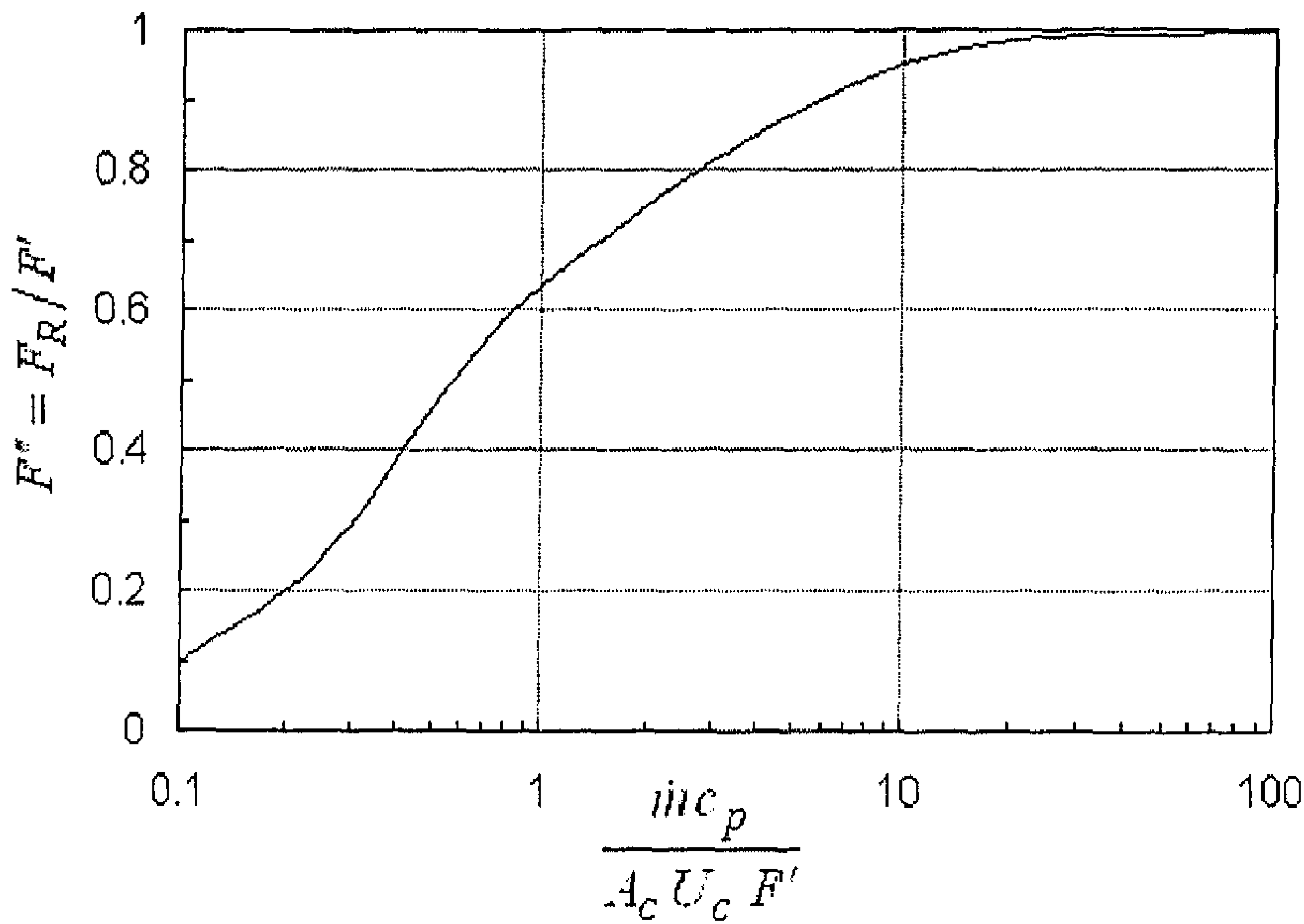
معامل سريان المجمع هذا، هو دالة في متغير واحد، وهو معدل السعة للمجمع $\frac{\dot{m} c_p}{A_c U_c F'}$، والعلاقة مبينة في الشكل (13.3).

وبهذا فان الطاقة المفيدة يمكن التعبير عنها أيضاً بدلالة F_R ولكن هذه المرة

مركبة الجو تكون دالة في درجة حرارة دخول المائع إلى المجمع وليست بدرجة حرارته الموضعية، مما يُسهل علينا إنجاز التقييم الحراري للمجمع، وتكون معادلة الطاقة المفيدة على الصورة التالية:

$$q_u = A_c F_R \left[H_a - U_c \left(T_{fi} - T_a\right)\right] \quad (58.3)$$

وتُسمى هذه المعادلة بمعادلة Hottel-Whillier-Bliss للمجمعات الشمسية.



شكل (13.3) معامل سريان المجمع F'' كدالة في $\dot{m} c_p / A_c U_c F'$

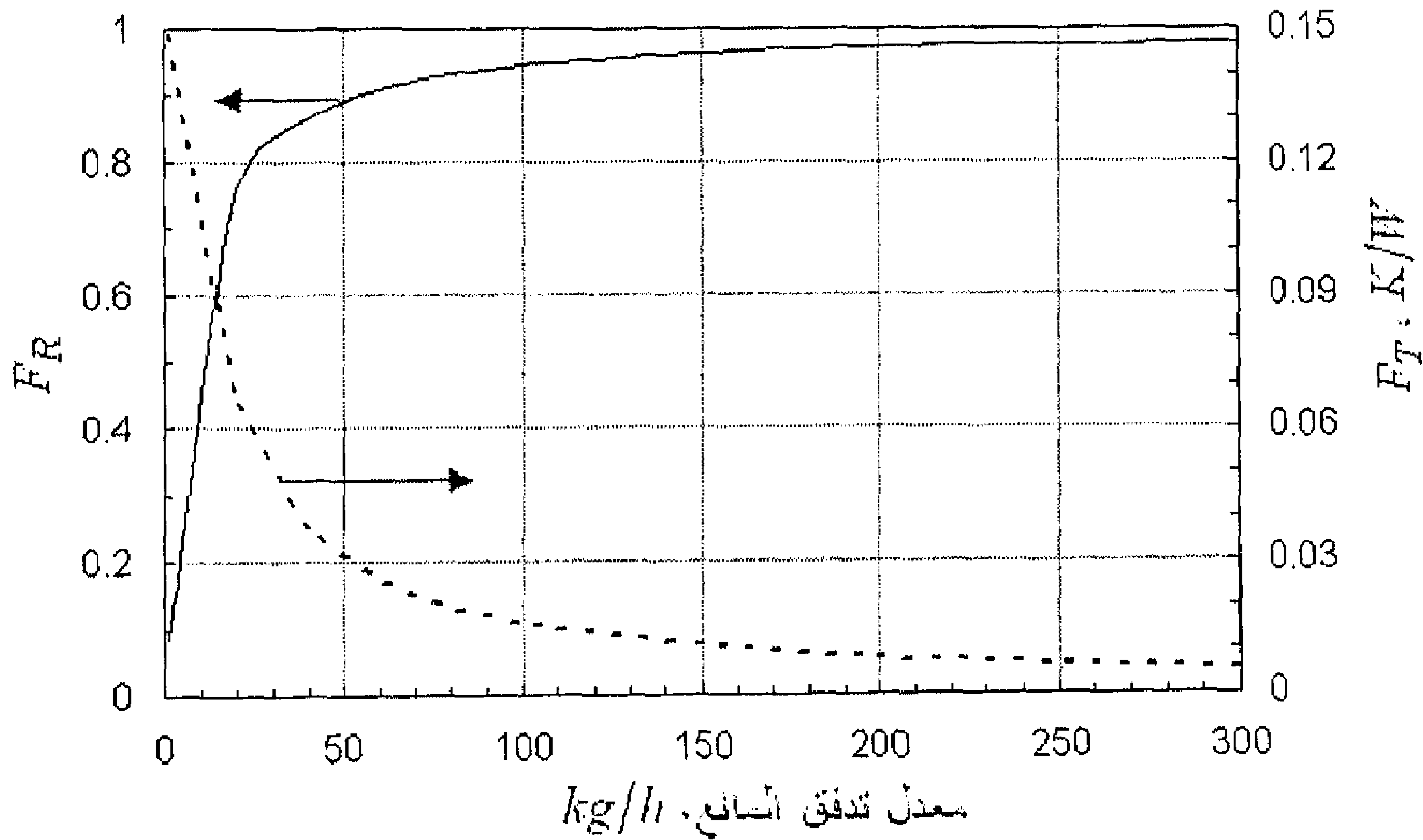
أضاف (Nassar, 1999) كمية أخرى للتقييم الحراري للمجمعات الشمسية، والتي ترتبط بمعدل زيادة درجة حرارة المائع وسمي هذا المعامل بمعامل تسخين المائع F_T، بوحدة (K/W). ويمكن استخلاصه من المعادلة (58.3)، كالتالي:

$$T_{fo} - T_{fi} = \Delta T_f = A_c F_T \left[H_a - U_c \left(T_{fi} - T_a\right)\right] \quad (59.3)$$

بمقارنة المعادلتين (59.3) و (58.3)، يكون:

$$F_T = \frac{F_R}{\dot{m} c_p} = \frac{1}{A_c U_c}\left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_c F'}{\dot{m} c_p}\right)\right] \qquad (60.3)$$

أهمية هذا المعامل تكمن في أنه المعامل الوحيد الذي يقوم بتقييم درجة حرارة المائع وليس تقييم الكمية الحرارية له. إن زيادة درجة حرارة المائع تتناسب عكسياً مع معدل تدفقه فكلما زاد معدل تدفق المائع قلت درجة حرارة خروجه من المجمع وهذا ينطبق على معامل تسخين المائع F_T. بينما تكون العلاقة معاكسة بالنسبة للمعاملات الأخرى F', F_R، والتي تتناسب طردياً مع معدل تدفق المائع. علاقة كلاً من معامل الإزاحة الحرارية F_R ومعامل تسخين المائع F_T، كدالة في معدل تدفق المائع مبينة في الشكل (14.3). ولمّا كانت درجة حرارة خروج المائع من المجمع من الأهمية بحيث أن جميع العمليات الحرارية التي تحدث لاحقاً في المنظومة الشمسية تعتمد بقدر كبير على درجة حرارة المائع وليس على المحتوى الحراري له.



شكل (14.3) قيم معامل الإزاحة الحرارية F_R ، ومعامل تسخين المائع F_T ، بدلالة معدل تدفق المائع $\dot{m}$

إن أداء المجمع الشمسي يمكن أن يُعين بدلالة كفاءته، والتي تُعرف بأنها نسبة الطاقة المفيدة المكتسبة لفترة زمنية معينة إلى الإشعاع الشمسي الساقط لنفس الفترة الزمنية. وتصاغ على الصورة التالية:

$$\eta_c = \frac{\int_0^{\tau} q_u \, d\tau}{A_c \int_0^{\tau} H_t \, d\tau} \qquad (61.3)$$

حيث: η_c = متوسط كفاءة المجمع في فترة زمنية τ

q_u = معدل الطاقة المفيدة المكتسبة

H_t = الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على المجمع

كما يمكن صياغة الكفاءة اللحظية للمجمع الشمسي على الصورة التالية:

$$\eta_c = \frac{q_u}{A_c H_t} \qquad (62.3)$$

في هذا الموضع، يمكن استنتاج بعض القوانين التي تربط عناصر المجمع الشمسي بعضها ببعض، وذلك باستخدام ما تم تطويره من معادلات في هذا الفصل، فعلى سبيل المثال، يمكن الحصول على صيغة لمتوسط درجة حرارة الصفيحة الماصة T_p من المعادلتين (37.3) و (58.3) على الصورة التالية:

$$T_p = T_{fi} + \frac{q_u / A_c}{U_c F_R} \left(1 - F_R\right) \qquad (63.3)$$

مثال 6.3

أحسب معدل الطاقة المفيدة المكتسبة والكفاءة لمجمع شمسي مستوي مائل ومتجه جنوباً موضوع على خط عرض $40^{\circ} N$، وذلك ليوم 21 يناير عند الساعة 11-12.

المعلومات الجوية والخاصة بالجمع الشمسي كالتالي:

الإشعاع الشمسي الساقط على سطح المجمع الشمسي المائل، $H_t = 720\, W/m^2$؛

درجة حرارة الهواء الجوي، $T_a = 5^\circ C = 278\ K$؛

مساحة المجمع الشمسي، $1m \times 2m$؛

غطاء زجاجي مفرد رقيق غير ماص للأشعة، $n = 1.526$؛

زاوية ميلان المجمع الشمسي، $s = 50^\circ$؛

سمك الصفيحة الماصة، $t = 0.5\, mm = 5 \times 10^{-4}\, m$؛

الموصلية الحرارية للصفيحة الماصة (نحاس)، $k = 385\, W/m.K$؛

امتصاصية الصفيحة الماصة، $\alpha_p = 0.95$؛

معامل الفقد الحراري الكلي، $U_c = 5.0\, W/m^2.K$؛

القطر الداخلي للأنابيب، $D_i = 10\ mm$؛ القطر الخارجي للأنابيب، $D_o = 11\ mm$؛

المسافة بين الأنابيب، $w = 150\ mm$؛

موصلية اللحام، $C_B = 35\, W/m.K$؛

معامل انتقال الحرارة بالحمل للسطح الداخلي للأنابيب، $h_{ci} = 300\ W/m^2.K$؛

معدل تدفق الماء الكلي خلال أنابيب الجمع، $\dot{m} = 0.03\ kg/s$؛

درجة حرارة دخول الماء إلى الجمع، $T_{f,in} = 50^\circ C = 323K$؛

الحرارة النوعية للماء، $c_p = 4190\ J/kg.K$.

الحل:

تُحسب زاوية الميلان ليوم 21 يناير ($n = 21$) من المعادلة (1.2):

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(284 + 21)\right] = -20^\circ$$

وتحدد زاوية الساعة عند 11:30 صباحاً من المعادلة (2.2):

$$h = -\frac{1}{4}(30) = -7.5^\circ$$

ويتم تعيين زاوية السقوط من المعادلة (6.2):

$$\cos i = \sin(L-s)\sin\delta + \cos(L-s)\cos\delta\cosh$$

$$= \sin(40-50)\sin(-20) + \cos(40-50)\cos(-20)\cos(-7.5) = 0.977$$

أي أن $\theta_1 = i = 12^\circ$، وبالتالي فإن زاوية الانكسار تُعطى بالمعادلة (1.3) على النحو التالي:

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{\sin\theta_1}{n}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{\sin 12}{1.526}\right) = 7.8^\circ$$

وتوجد المركبات العمودية والموازية لكل من الانعكاسية والنفاذية كالتالي:

$$\rho_\perp = \frac{\sin^2(\theta_1-\theta_2)}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)} = \frac{\sin^2(12-7.8)}{\sin^2(12+7.8)} = 0.0467$$

$$\rho_\parallel = \frac{\tan^2(\theta_1-\theta_2)}{\tan^2(\theta_1+\theta_2)} = \frac{\tan^2(12-7.8)}{\tan^2(12+7.8)} = 0.0416$$

$$\tau(\rho'_\perp) = \frac{1-\rho'_\perp}{1+\rho'_\perp} = \frac{1-0.0467}{1+0.0467} = 0.911$$

$$\tau(\rho'_\parallel) = \frac{1-\rho'_\parallel}{1+\rho'_\parallel} = \frac{1-0.0416}{1+0.0416} = 0.920$$

وبهذا فإن متوسط نفاذية الغطاء الزجاجي هي:

$$\tau = \frac{1}{2}\left[\tau(\rho'_{\perp}) + \tau(\rho'_{\parallel})\right] = \frac{1}{2}[0.911 + 0.920] = 0.92$$

وبالتالي فإن الطاقة الشمسية الممتصة في الصفيحة الماصة هي:

$$H_a = (\tau \alpha_p) H_t = (0.92 \times 0.95) \times (720) = 627\ W/m^2$$

والآن سيتم إيجاد حدود معامل الكفاءة للمجمع الشمسي:

$$m = \left(\frac{U_c}{k\,t}\right)^{1/2} = \left(\frac{5.0}{385 \times 5 \times 10^{-4}}\right)^{1/2} = 5.1\,m^{-1}$$

$$mL = 5.1 \times 0.0695 = 0.354$$

تُحسب كفاءة الزعنفة من المعادلة (45.3):

$$F = \left(\frac{\tanh mL}{mL}\right) = \left(\frac{\tanh 0.354}{0.354}\right) = 0.960$$

وبهذا فإن معامل الكفاءة يمكن حسابه الآن من المعادلة (50.3):

$$F' = \frac{1/U_c}{w\left[\dfrac{1}{U_c\,(2LF + D)} + \dfrac{1}{C_B} + \dfrac{1}{h_i\,\pi\,D_i}\right]}$$

$$= \frac{1/5.0}{(0.15)\left[\dfrac{1}{5.0(2 \times 0.0695 \times 0.960 + 0.011)} + \dfrac{1}{35} + \dfrac{1}{300\pi \times 0.010}\right]} = 0.878$$

ويعين معامل الإزاحة الحرارية من المعادلة (56.3):

$$F_R = \frac{\dot{m}\,c_p}{A_c\,U_c}\left[1-\exp\left(-\frac{A_c\,U_c\,F'}{\dot{m}\,c_p}\right)\right]$$

$$= \frac{(0.03)\,(4190)}{(1\times 2)\,(5.0)}\left[1-\exp\left(-\frac{1\times 2\times 5.0\times 0.878}{0.03\times 4190}\right)\right] = 0.848$$

وبالتالي فإن معدل الطاقة المفيدة المكتسبة في المجمع الشمسي تُعطى من المعادلة (58.3) كالتالي:

$$q_u = A_c\,F_R\left[H_a - U_c\left(T_{fi} - T_a\right)\right]$$

$$= (1\times 2)(0.848)[629-5.0(323-278)] = 685\,W \qquad \triangleleft$$

وتُحسب الكفاءة اللحظية للمجمع الشمسي باستخدام المعادلة (62.3):

$$\eta_c = \frac{q_u}{A_c\,H_t} = \frac{685}{(1\times 2)(720)} = 0.476 = 47.6\% \qquad \triangleleft$$

2.5.3 توزيع درجات الحرارة في المجمعات الشمسية الهوائية

الشكل (15.3) يبين بعض تصاميم مجمعات تسخين الهواء. وأدرجت أيضاً في الشكل المعادلات الخاصة بمعامل الكفاءة للمجمع F' ومعامل الفقد الحراري الكلي U_c، كما ورد في (Duffie, Beckman, 1991).

سوف تُتبع نفس الخطوات السابقة لتقييم الأداء الحراري للمجمعات الشمسية للموائع، ولتوضيح ذلك سوف يُدرس المجمع الشمسي المبين في الشكل (15.3) النوع (أ) وصولاً إلى اشتقاق معادلات F'، U_c.

الشكل (16.3) يبين الاتزان الحراري للمجمع الشمسي والمقاومات الحرارية المرافقة.

باعتبار جزء من مجمع شمسي على وحدة العرض العمودية على اتجاه سريان الهواء وبطول δx وارتفاع القناة s، فإنه يمكن استنتاج معادلة اتزان الطاقة لعناصر المجمع كالتالي:

معادلة اتزان الطاقة للصفيحة الماصة بمساحة $(\delta x.1)$:

$$H_a\,\delta x = U_b\,\delta x\left(T_p - T_a\right) + h_{cpf}\,\delta x\left(T_p - T_f\right) + h_{rpg_1}\,\delta x\left(T_p - T_{g_1}\right) \qquad (64.3)$$

معادلة اتزان الطاقة لتيار الهواء في حجم التحكم $(s.\delta x.1)$:

$$\dot{m}\,c_p\left(\frac{dT}{dx}\delta x\right) = h_{cpf}\,\delta x\left(T_p - T_f\right) + h_{cg_1f}\,\delta x\left(T_{g_1} - T_f\right) \qquad (65.3)$$

معادلة اتزان الطاقة للغطاء الزجاجي بمساحة $(\delta x.1)$ تُعطى:

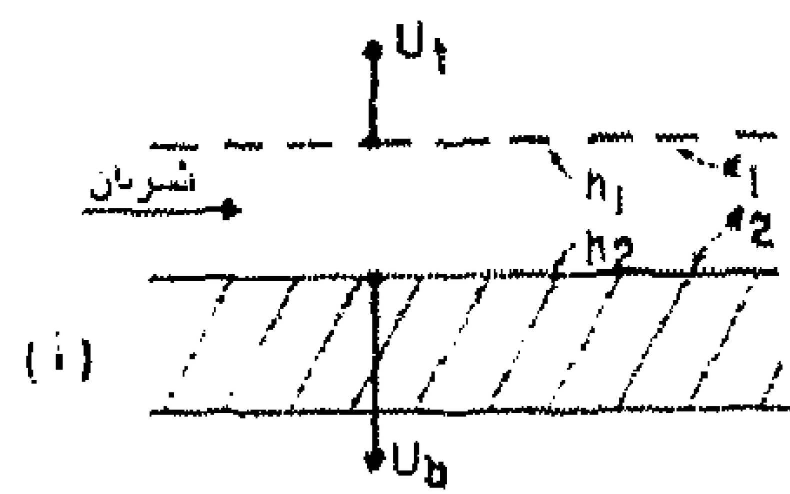
$$h_{rpg_1}\,\delta x\left(T_p - T_{g_1}\right) = U_t\,\delta x\left(T_{g_1} - T_a\right) + h_{cg_1f}\,\delta x\left(T_{g_1} - T_f\right) \qquad (66.3)$$

كما يمكن صياغة فيض الطاقة المفيدة المكتسبة q''_u الناتج من انتقال الحرارة بالحمل من الغطاء الشفاف والصفيحة الماصة، على الصورة التالية:

$$q''_u = h_{cpf}\left(T_p - T_f\right) + h_{cg_1f}\left(T_{g_1} - T_f\right) \qquad (67.3)$$

ولإيجاد $\left(T_{g_1} - T_f\right), \left(T_p - T_f\right)$، يُعوض بالمعادلة (64.3) في المعادلة (66.3) فنحصل على درجة حرارة الغطاء الزجاجي كدالة فقط في درجة حرارة المائع ودرجة حرارة المحيط والإشعاع الشمسي الممتص في الصفيحة الماصة، $T_{g_1} = f\left(T_f, T_a, H_a\right)$، وبالمثل يُعوض بالمعادلة (66.3) في المعادلة (64.3) فنحصل على درجة حرارة الصفيحة الماصة كدالة فقط في درجة حرارة المائع ودرجة حرارة المحيط والإشعاع الشمسي الممتص في الصفيحة الماصة $T_p = f\left(T_f, T_a, H_a\right)$.

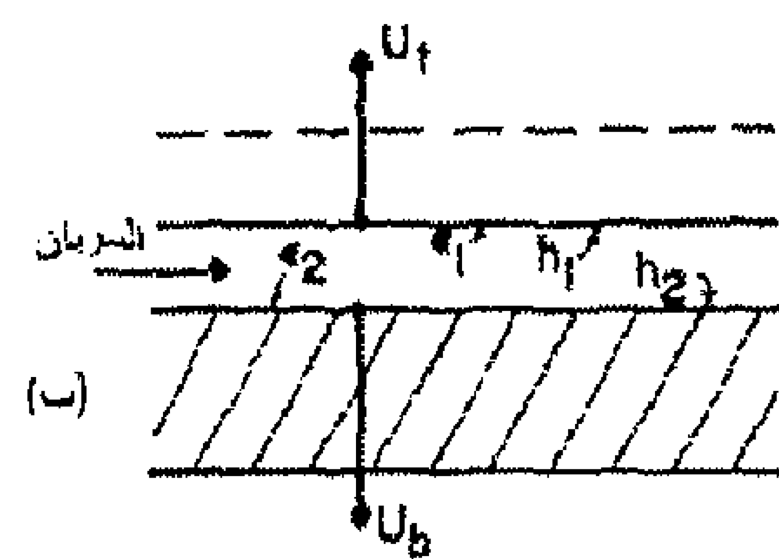
وتكون النتيجة كالتالي:



$$U_c = \frac{(U_b + U_t)(h_1 h_2 + h_1 h_r + h_2 h_r) + U_b U_t (h_1 + h_2)}{h_1 h_r + h_2 U_t + h_2 h_r + h_1 h_2}$$

$$F' = \frac{h_r h_1 + h_2 U_t + h_2 h_r + h_1 h_2}{(U_t + h_r + h_1)(U_b + h_2 + h_r) - h_r^2}$$

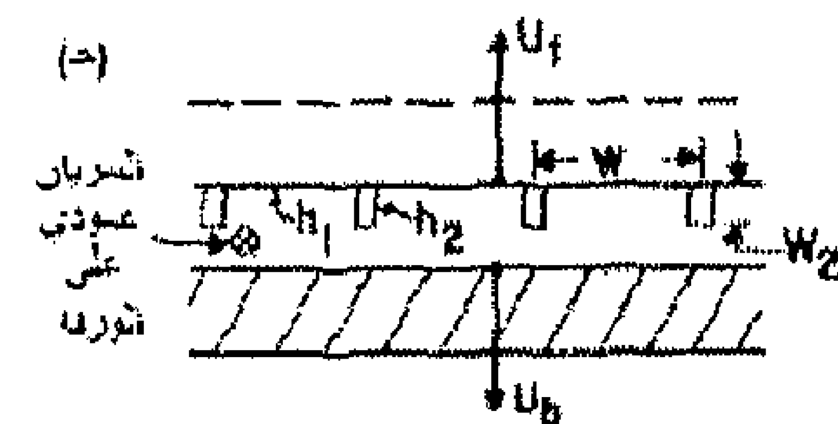
$$h_r = \frac{\sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$



$$U_c = U_t + U_b$$

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_L}{h_1 + \frac{1}{\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_r}}}}$$

h_r = كما فى (أ)

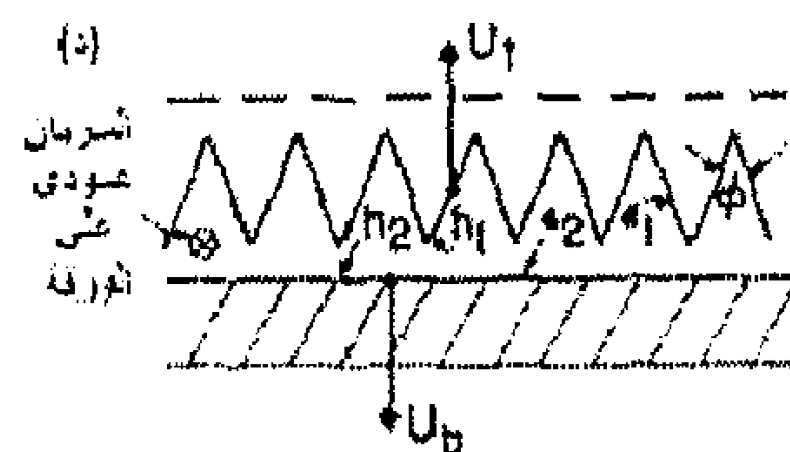


$$F' = F'_o \left[1 + \frac{1 - F'_o}{\frac{F'_o}{F_p} + \frac{W h_1}{2 W_2 h_2 F_F}} \right]$$

F'_o = F' في (ب)

F_p = كفاءة زعنفة الصفيحة

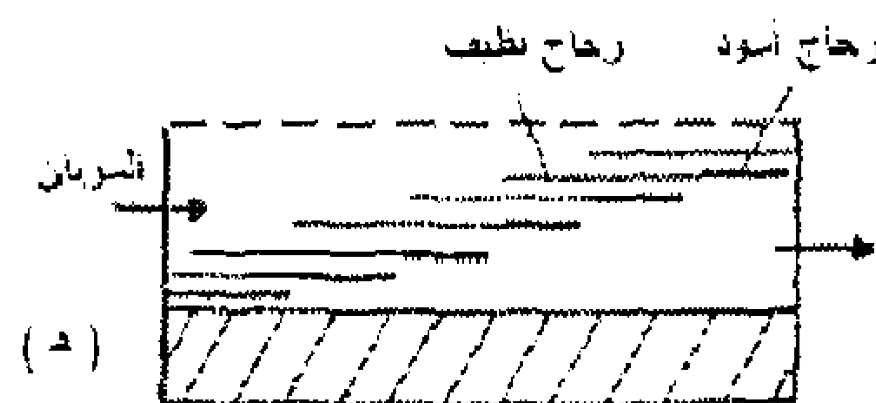
F_F = كفاءة زعنفة الزعنفة



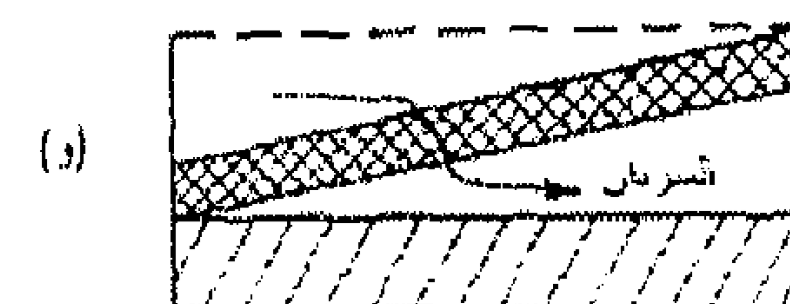
$$U_c = U_t + U_b$$

U_t على أساس مساحة المسقط

F' = كما في (ب) ولكن h_1 مبدل إلى $h_1 / \sin \phi/2$

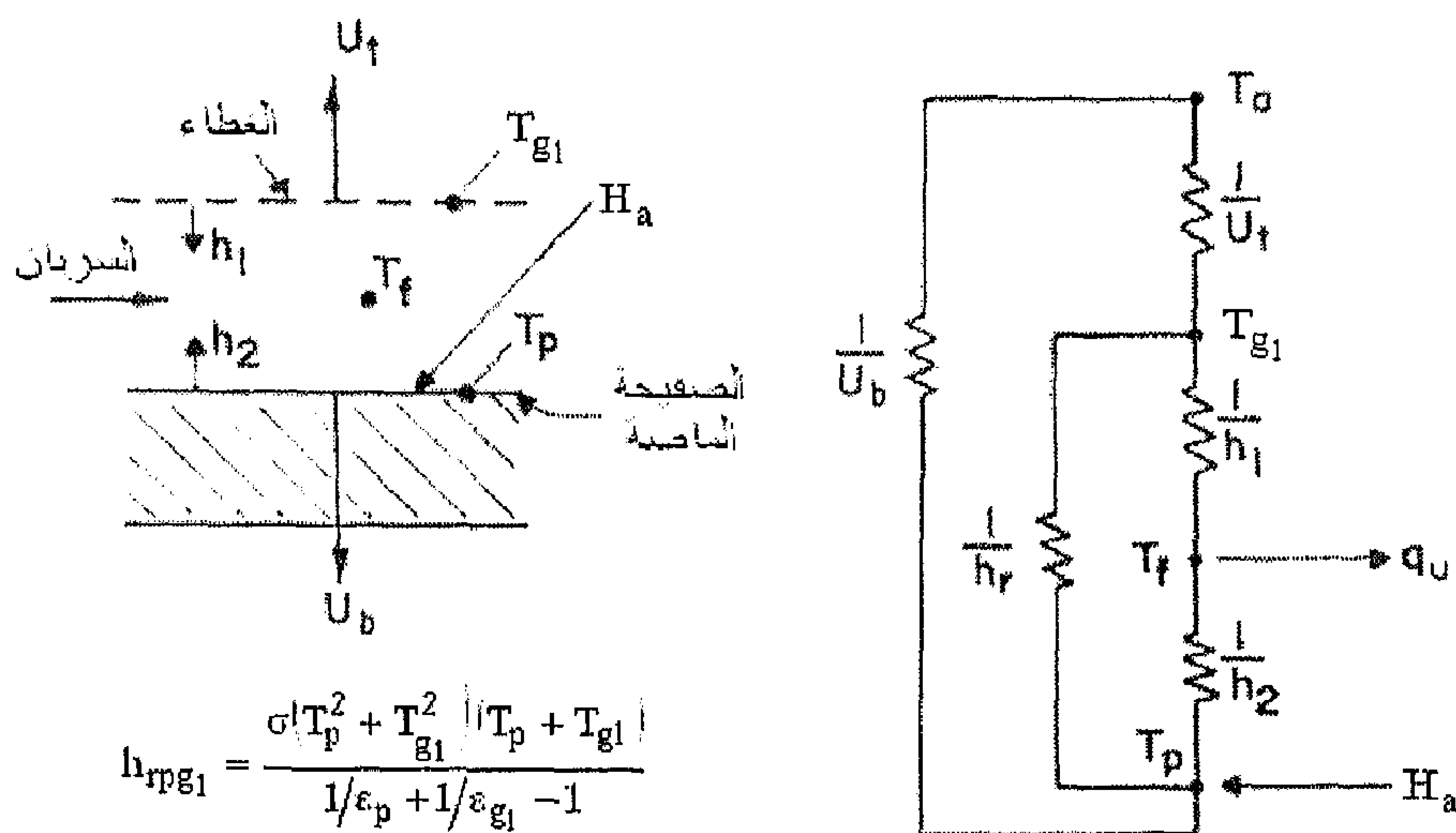


أنظر Selcuk (1971)



أنظر Hamid & Beckman (1971)

شكل (15.3) تصاميم لمجمعات تسخين الهواء ومعاملات الكفاءة والفقد الحراري الكلي. المجمعات (ب)، (جـ)، (د) تم فرض أن الفقد الحراري السفلي يتم عند نفس درجة حرارة الفقد الحراري العلوي



شكل (16.3) مجمع لتسخين الهواء نوع (أ) وشبكة المقاومات الحرارية

$$\left(T_p - T_f\right) = \frac{\left\{\begin{matrix} H_a\left(U_t + h_{rpg_1} + h_{cg_1f}\right) - \\ \left(T_f - T_a\right)\left(U_t\,h_{rpg_1} + U_t\,U_b + U_b\,h_{rpg_1} + U_b\,h_{cg_1f}\right)\end{matrix}\right\}}{\left(U_t + h_{cg_1f} + h_{rpg_1}\right)\left(U_b + h_{cpf} + h_{rpg_1}\right) - h_{rpg_1}^2} \qquad (68.3)$$

$$\left(T_{g_1} - T_f\right) = \frac{\left\{\begin{matrix} H_a\,h_{rpg_1} - \\ \left(T_f - T_a\right)\left(U_t\,h_{cpf} + U_t\,U_b + U_t\,h_{rpg_1} + U_b\,h_{rpg_1}\right)\end{matrix}\right\}}{\left(U_t + h_{cg_1f} + h_{rpg_1}\right)\left(U_b + h_{cpf} + h_{rpg_1}\right) - h_{rpg_1}^2} \qquad (69.3)$$

وبتعويض المعادلتين (68.3) و (69.3) في المعادلة (67.3)، تُوضع الصيغة النهائية للمعادلة الناتجة على الصورة:

$$q_u'' = F'\left[H_a - U_c\left(T_f - T_a\right)\right] \qquad (70.3)$$

وبمناظرة الحدود، فيكون الحد الذي مع H_a يمثل F' والحد الذي مع $(T_f - T_a)$ يمثل $F'U_c$ ومنه يمكن استنباط التالي:

$$F' = \frac{h_{rpg_1} h_{cg_1 f} + U_t h_{cpf} + h_{rpg_1} h_{cpf} + h_{cg_1 f} h_{cpf}}{\left(U_t + h_{cg_1 f} + h_{rpg_1}\right)\left(U_b + h_{cpf} + h_{rpg_1}\right) - h_{rpg_1}^2} \qquad (71.3)$$

$$U_c = \frac{(U_t + U_b)\left(h_{rpg_1} h_{cg_1 f} + h_{rpg_1} h_{cpf} + h_{cg_1 f} h_{cpf}\right) + U_t U_b \left(h_{cg_1 f} + h_{cpf}\right)}{h_{rpg_1} h_{cg_1 f} + U_t h_{cpf} + h_{rpg_1} h_{cpf} + h_{cg_1 f} h_{cpf}} \qquad (72.3)$$

معادلات المجمع نوع (ب) المدرجة في الشكل (15.3)، أُشتقت بنفس الطريقة ولكن للتبسيط، تم فرض أن الفقد الحراري من الأسفل يحدث عند درجة حرارة الصفيحة الماصة. أشتق (Nassar, 1999) كلاً من F', U_c، لنفس المجمع في حالة أن الفقد الحراري السفلي يحدث عند درجة حرارة الصفيحة السفلية للمجمع T_b، وكانت النتيجة على الصورة التالية:

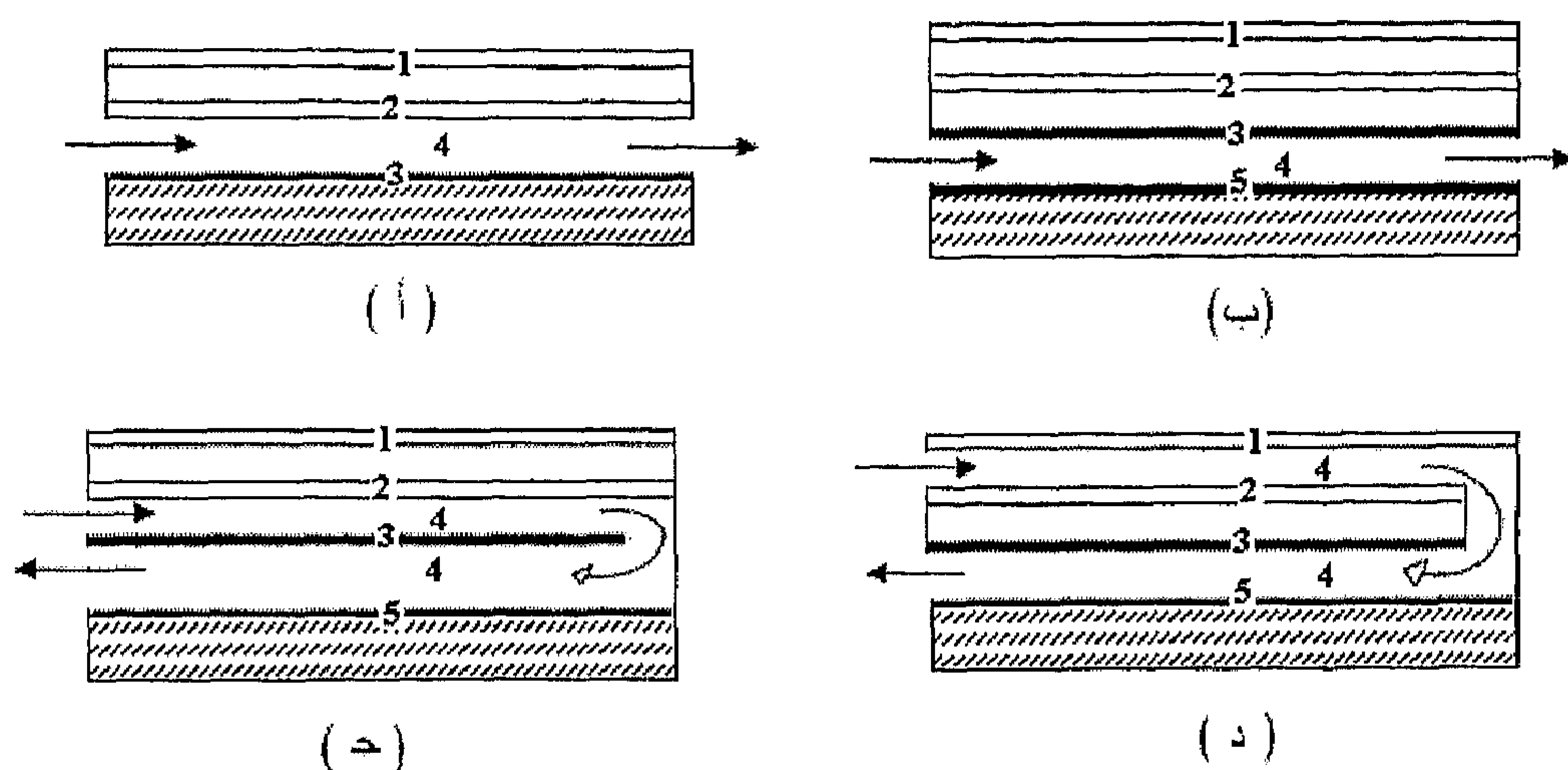
$$U_c = \left(U_t + U_b \frac{F''}{F'}\right) \qquad (73.3)$$

$$F'' = \frac{U_t h_{cpf} + h_{rpb} h_{cpf} + h_{rpb} h_{cbf} + h_{cpf} h_{cbf}}{\left(U_t + h_{cpf} + h_{rpb}\right)\left(U_b + h_{cbf} + h_{rpb}\right) - h_{rpb}^2} \qquad (74.3)$$

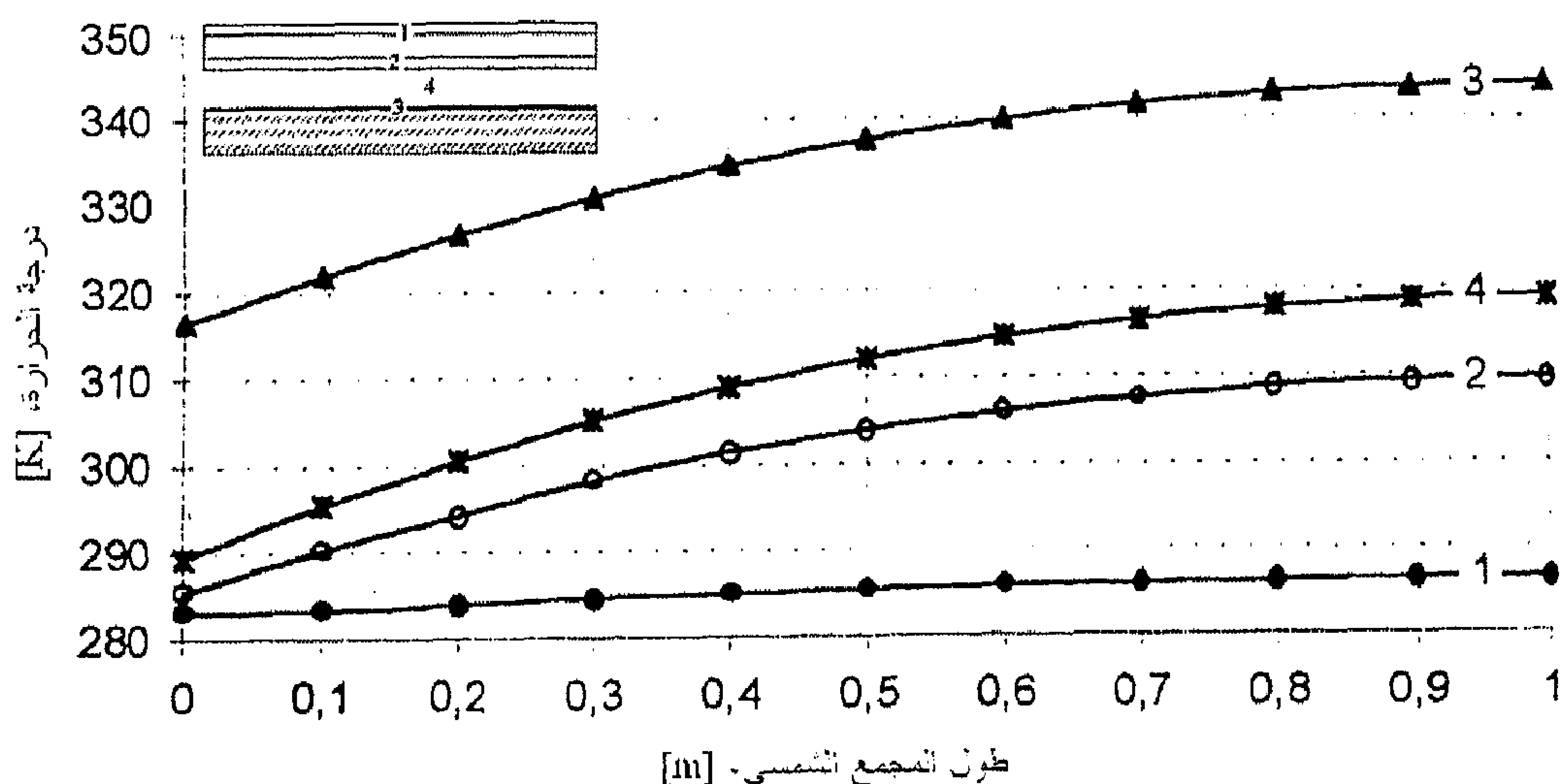
$$F' = \frac{U_b h_{cpf} + h_{rpb} h_{cpf} + h_{rpb} h_{cbf} + h_{cpf} h_{cbf}}{\left(U_t + h_{cpf} + h_{rpb}\right)\left(U_b + h_{cbf} + h_{rpb}\right) - h_{rpb}^2} \qquad (75.3)$$

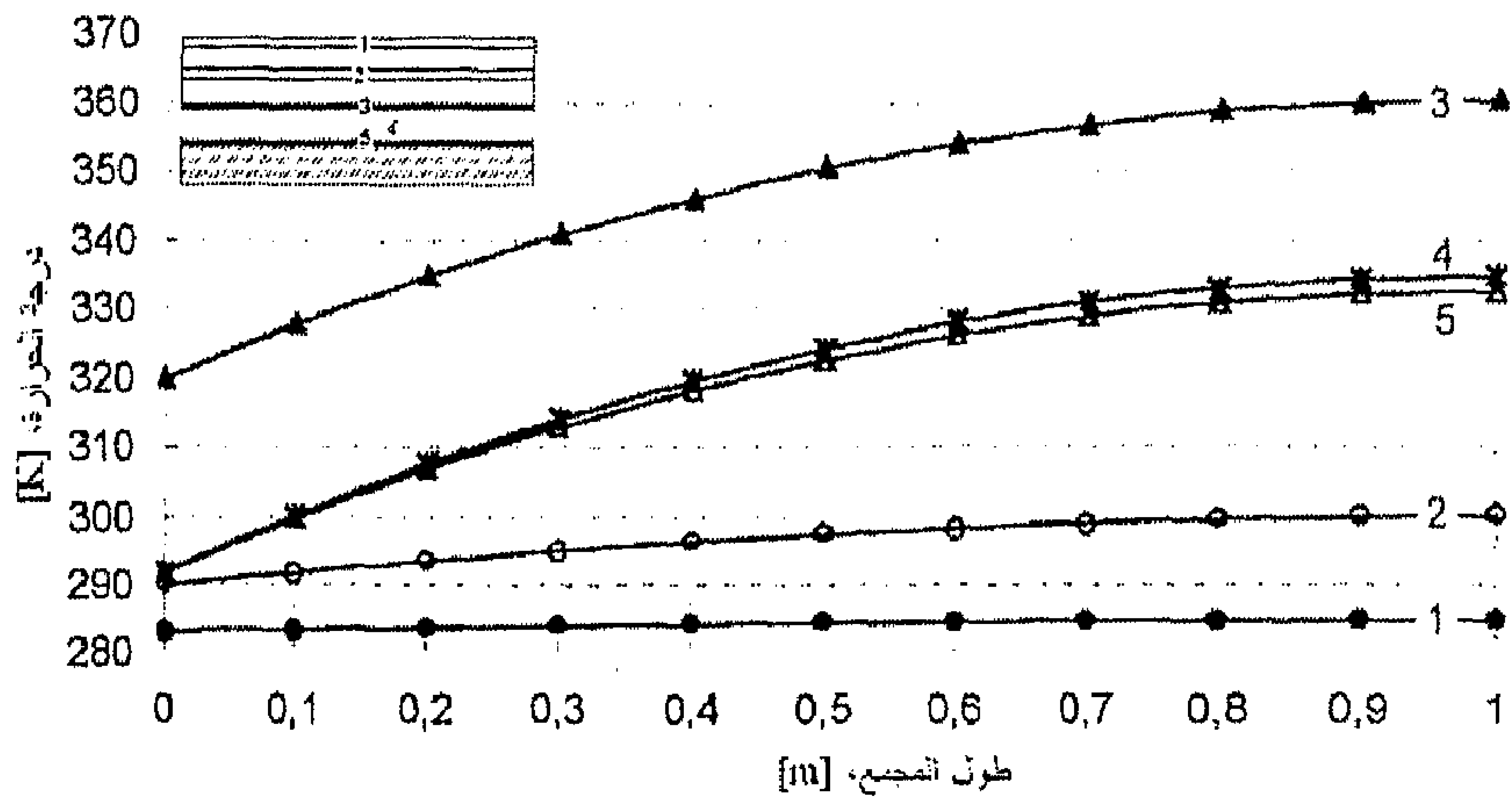
أوردت الدراسة المشار إليها أعلاه مجموعة المعادلات الخاصة بالخصائص الحرارية F' , U_c، وتوزيع درجات الحرارة لعناصر أربعة أنواع من المجمعات الشمسية المبينة في الشكل (17.3)، للحالتين المستقرة واللامستقرة. مقارنة لتوزيع درجات حرارة الأنواع المدروسة مثلت بيانيا في الشكل (18.3)، وذلك عند: معدل تدفق الهواء عبر المجمع $\dot{m} = 29\,\text{kg/m}^2\text{h}$، $H_t = 1000\,\text{W/m}^2$ ، $T_{fi} = 20$, $T_a = 10°\,C$، (Nassar, 2000).

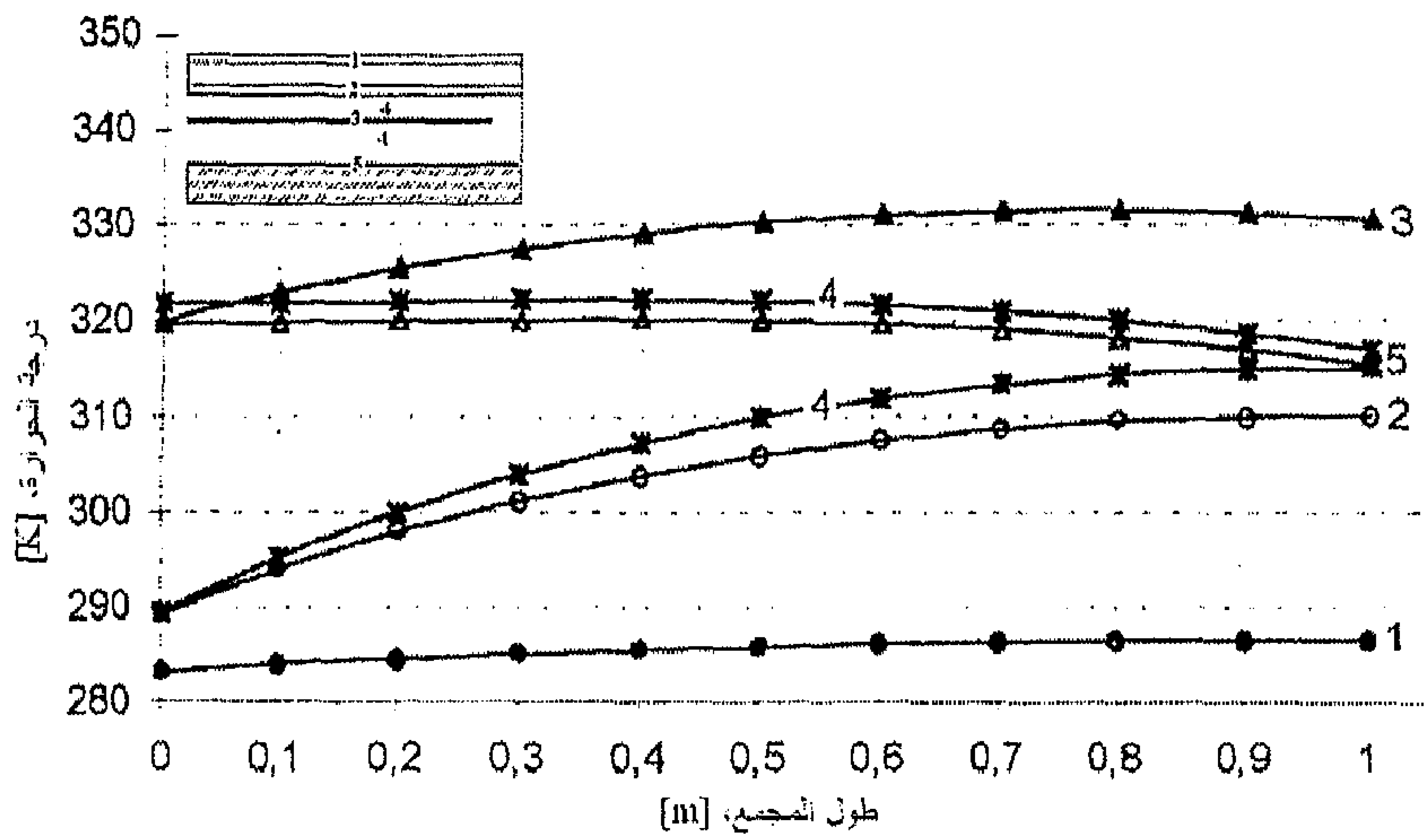
يبين الشكل (18.3) تمثيلاً لدرجات الحرارة الموضعية للمجمعات الشمسية المبينة في الشكل (17.3) وبنفس ترتيب الأرقام.

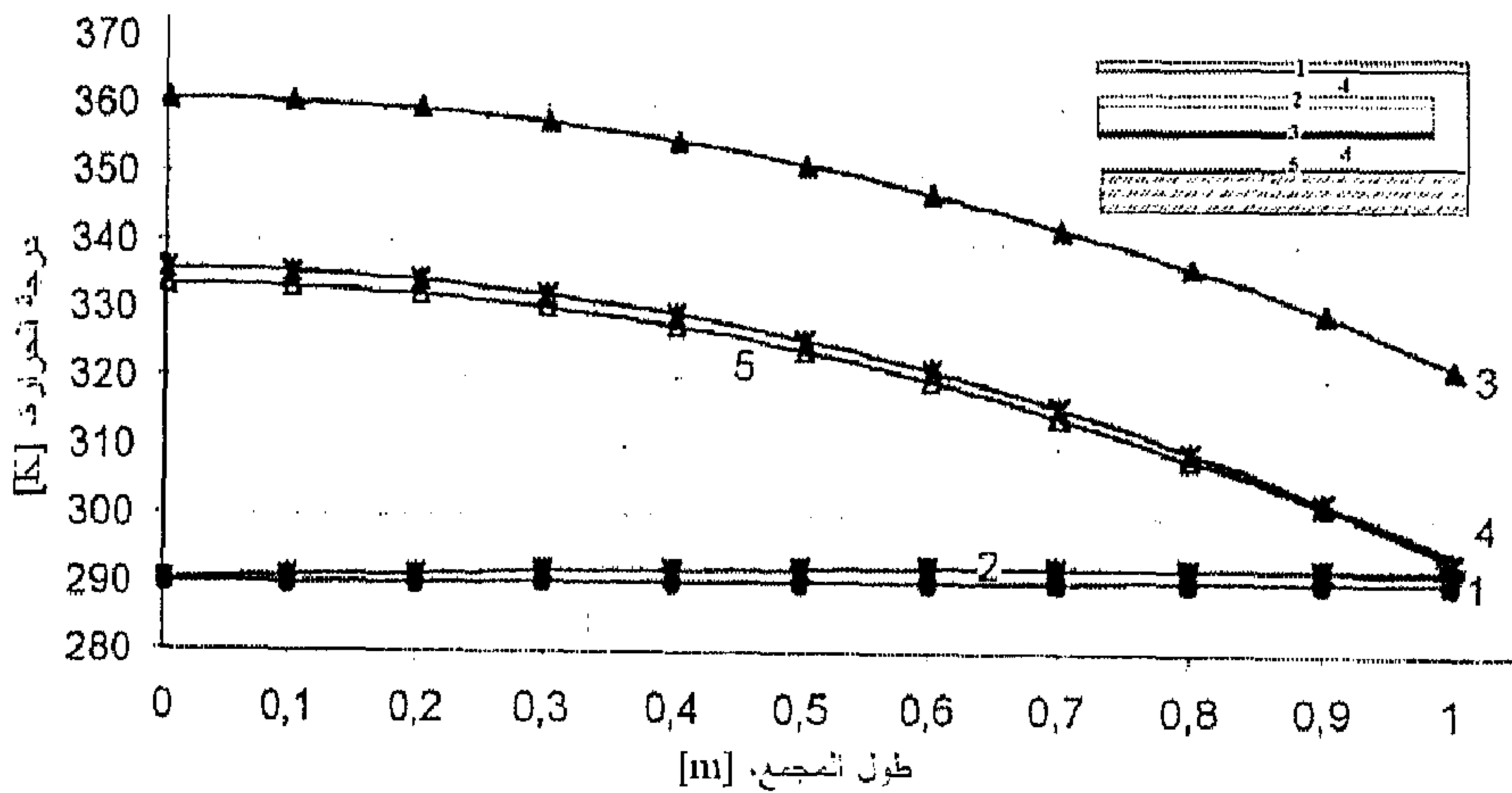


شكل (17.3) أشكال مختلفة من المجمعات الشمسية الهوائية المستوية واتجاه سريان الهواء. الأرقام المدرجة في الشكل تدل على التوالي على: الغطاء الزجاجي الأول، الغطاء الزجاجي الثاني، الصفيحة الماصة، الهواء، الصفيحة السفلى، وهذه الأرقام مطابقة لدرجات الحرارة الموضعية في الشكل (18.3)









شكل (18.3) درجات الحرارة الموضعية لبعض تصاميم المجمعات الشمسية الهوائية المستوية

مثال 7.3

أحسب درجة حرارة خروج الهواء وكفاءة مجمع شمسي لتسخين الهواء بغطاء زجاجي مفرد للنوع المبين في الشكل (15.3 ب)، بالمواصفات التالية:

عرض المجمع الشمسي، $w = 1\,m$؛ الطول، $l = 5\,m$؛ وعمق قناة الهواء، $s = 12\,mm$؛

الإشعاع الشمسي الكلي، $H_t = 850\,W/m^2$؛

درجة حرارة الهواء الجوي، $T_a = 5°\,C = 278\,K$؛

السطح العلوي للصفيحة الماصة انتقائية، وينتج عن هذا كفاءة بصرية $(\tau\alpha) = 0.85$؛

معامل الفقد الحراري العلوي، $U_t = 5.0\,W/m^2.K$؛ ومعامل الفقد السفلي مهمل.

انبعاثية السطح السفلي للصفيحة الماصة، $\varepsilon_p = 0.95$؛

انبعاثية الصفيحة السفلية، $\varepsilon_b = 0.95$؛

معدل تدفق الهواء خلال المجمع، $\dot{m} = 220\,kg/hr = 0.061\,kg/s$؛

درجة حرارة دخول الهواء إلى المجمع، $T_{f,in} = 60°\,C = 333K$.

الحل:

بما أن معاملات انتقال الحرارة في قناة تدفق الهواء تعتمد على درجات حرارة جدران القناة والهواء داخلها، وهي مجهولة، فإن استخدام تقنية (التجربة والخطأ) سيصبح ضرورياً. لتسهيل الحل، يتم فرض التالي:

$$4\left(T_{air,mean}\right)^3 = \left(T_p + T_b\right)\left(T_p^2 + T_b^2\right)$$

حيث: $T_{air,mean}$ – متوسط درجة حرارة الهواء في القناة؛

$T_p\ ,T_b$ – متوسط درجات حرارة الصفيحة السفلية والصفيحة الماصة، على التوالي.

تبعاً لذلك، فإن معامل انتقال الحرارة بالإشعاع من الصفيحة الماصة إلى الصفيحة السفلية يمكن صياغتها على الصورة التالية:

$$h_{rpb} = \frac{\sigma\left(T_p^2 + T_b^2\right)\left(T_p + T_b\right)}{\left(1/\varepsilon_p\right) + \left(1/\varepsilon_b\right) - 1} = \frac{4\sigma\left(T_{air,mean}\right)^3}{\left(1/\varepsilon_p\right) + \left(1/\varepsilon_b\right) - 1}$$

والآن يمكن فرض أن $T_{air,mean} = 75^\circ C = 348\,K$ لعملية (التجربة والخطأ). وبالتالي فإن معامل انتقال الحرارة بالإشعاع يمكن حسابه كالتالي:

$$h_{rpb} = \frac{4\left(5.67\times10^{-8}\right)(348)^3}{(1/0.95) + (1/0.95) - 1} = 8.6\,W/m^2.K$$

وبفرض أن معاملات انتقال الحرارة بالحمل من الصفيحتين (السفلية والماصة) إلى تيار الهواء المار بينهما متساويتين (أي أن $h_{cpf} = h_{cbf}$) (رغم ابتعاد ذلك عن الحقيقة بعض الشيء، وذلك لاختلاف درجات حرارة الصفيحتين، للمزيد من المعلومات أنظر (Nassar, Sergievsky, 2000)). ولإيجاد قيمة هذه المعاملات، يجب أولاً الحصول على الخواص الحرارية والهيدروديناميكية للهواء عند درجة الحرارة المفروضة وهي $75^\circ C$ من الجداول الخاصة بخواص الهواء:

$\mu = 2.07\times10^{-5}\,kg/m.s$ ، $k = 0.0299\,W/m.K$ ، $c_p = 1009\,J/kg.K$.

القطر الهيدروليكي لقناة الهواء:

$$D = 4\left(\frac{\text{مساحة مقطع التدفق}}{\text{المحيط المبلل}}\right) = 4\left(\frac{W\,S}{2\,W}\right) = 2S$$

$$= 2\,(0.012) = 0.024\,m$$

نسبة الطول إلى القطر:

$$\frac{l}{D} = \frac{5}{0.024} = 208$$

بعدها يتم حساب رقم رينولدز، وهو على الصورة التالية:

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{\dot{m} D}{A \mu} = \frac{(0.061)(0.024)}{(1\times 0.012)\left(2.07\times 10^{-5}\right)} = 5890$$

وبالتالي يعتبر هذا الجريان مضطرباً. وباختيار المعادلة المناسبة لمعامل انتقال الحرارة، فإنه:

$$h_{cpf} = h_{cbf} = \left(\frac{k}{D}\right) 0.0158 \left(Re_D\right)^{0.8}$$

$$= \left(\frac{0.0299}{0.024}\right) 0.0158 (5890)^{0.8} = 20\ W/m^2.K$$

والآن يمكن إيجاد معامل الكفاءة للمجمع باستخدام المعادلة (75.3) كالتالي:

$$F' = \frac{U_b\, h_{cpf} + h_{rpb} h_{cpf} + h_{rpb} h_{cbf} + h_{cpf}\, h_{cbf}}{\left(U_t + h_{cpf} + h_{rpb}\right)\left(U_b + h_{cbf} + h_{rpb}\right) - h_{rpb}^2}$$

$$= \frac{0 + 8.6\times 20 + 8.6\times 20 + 20\times 20}{(5.0 + 20 + 8.6)(0 + 20 + 8.6) - (8.6)^2} = 0.839$$

ومن المعادلة (73.3) ينتج أن $U_c = U_t$

كما يمكن الحصول على درجة حرارة خروج الهواء من المجمع باستخدام معامل تسخين المائع من معادلة (60.3) ودمجه مع المعادلة (59.3)، نحصل على:

$$T_{f,out} = T_{f,in} + \frac{1}{U_c}\left[H_a - U_c\left(T_{f,in} - T_a\right)\right]\left[1 - \exp\left(-\frac{A_c\, U_c\, F'}{\dot{m}\, c_p}\right)\right]$$

$$= 60 + \frac{1}{5}[850(0.85) - 5(60-5)]\left[1 - \exp\left(-\frac{5 \times 5 \times 0.84}{0.061 \times 1009}\right)\right]$$

$$= 86^\circ C$$

وبالتالي، فإن متوسط درجة حرارة الهواء هي:

$$T_{air,mean} = \frac{1}{2}\left(T_{f,in} + T_{f,out}\right) = \frac{1}{2}(60 + 86) = 73^\circ C$$

وهي بطبيعة الحال، ليست كالقيمة التي تم فرضها في البداية والتي كانت $75^\circ C$. وبالتالي، يجب أن نكرر التجربة مرة أخرى وبقيمة جديدة لمتوسط درجة حرارة الهواء، ولتكن هذه المرة: $T_{air,mean} = 73^\circ C = 349\ K$. تُحدد الخواص الحرارية للهواء عند درجة الحرارة الأخيرة:

$\mu = 2.07 \times 10^{-5}\ kg/m.s$ ، $k = 0.0297\ W/m.K$ ، $c_p = 1009\ J/kg.K$.

وبإعادة جميع العمليات الحسابية ذات العلاقة، والنتيجة تكون على الصورة التالية:

$h_{rpb} = 8.5\ W/m^2.K$ ؛ $\mathrm{Re}_D = 5890$ ؛ $h_{cpf} = h_{cbf} = 20\ W/m^2.K$ ؛ $F' = 0.84$ ؛

وصولاً إلى $T_{f,out} = 86^\circ C$. وبالتالي فإن، $T_{air,mean} = 73^\circ C$، وهي مطابقة تماماً لتلك القيمة المفروضة مسبقاً. وبالتالي فإن درجة حرارة خروج الهواء من المجمع هي:

$$T_{f,out} = 86^\circ C \qquad \triangleleft$$

ومن المعادلة (56.3)، نحصل على:

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_c U_c}\left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_c F'}{\dot{m} c_p}\right)\right]$$

$$= \frac{0.061 \times 1009}{5 \times 5}\left[1 - \exp\left(-\frac{5 \times 5 \times 0.84}{0.061 \times 1009}\right)\right] = 0.71$$

وبالتالي، يمكن حساب الطاقة المفيدة المكتسبة من المعادلة (58.3)

$$q_u = A_c\, F_R\left[H_a - U_c\left(T_{fi} - T_a\right)\right]$$
$$= (1 \times 5)[850(0.85) - 5(60 - 5)] = 1590\, W$$

وبهذا فإن كفاءة المجمع تكون:

$$\eta_c = \frac{q_u}{A_c\, H_t} = \frac{1590}{(1 \times 5)(850)} = 0.37 = 37\%$$ ◁

6.3 الاختبارات المعملية للمجمعات الشمسية المستوية

يعتمد أداء المنظومات الشمسية أساساً على أداء المجمعات الشمسية. لهذا كان لقياسات أداء المجمعات الشمسية أهمية كبيرة لفهم الأداء الوظيفي الكلي للمنظومة. أيضاً لمطابقة النماذج الرياضية مع النتائج المعملية والتي تُعطي بدورها نوعاً من الثقة لتبني تلك النماذج الرياضية والتي على أساسها سيتم تصميم المنظومة الشمسية. ولذا كان دائماً من المرغوب فيه الحصول على مثل هذا التوكيد كلما سمحت الظروف بذلك.

ففي منتصف 1970 ظهر العديد من تصميمات المجمعات الشمسية، ولذا كان لزاماً على مكتب القياسات الوطني في الولايات المتحدة، وضع مرجع قياسي لأداء المجمعات الشمسية، والذي طوّرته فيما بعد (ASHRAE) في عام 1977. حيث وضعت الجمعية أربعة معايير قياسية، ثلاثة منها لمجمعات تسخين المياه وواحد

لمجمعات تسخين الهواء. تمثل الأشكال (19.3) و (20.3) رسماً تخطيطياً لمنظومات اختبار مجمع شمسي مائي وهوائي، على التوالي. والمطلوب من التجربة إجراء القياسات التالية:

1. إجراء تجارب متعددة باختلاف درجة حرارة دخول المائع.
2. قياس شدة الإشعاع الشمسي بواسطة البرانوميتر على مستوى المجمع الشمسي.
3. قياس معدل التدفق، درجة حرارة دخول وخروج المائع، والمعلومات الجوية.
4. قياس الضغط وفقد الضغط خلال المجمع.

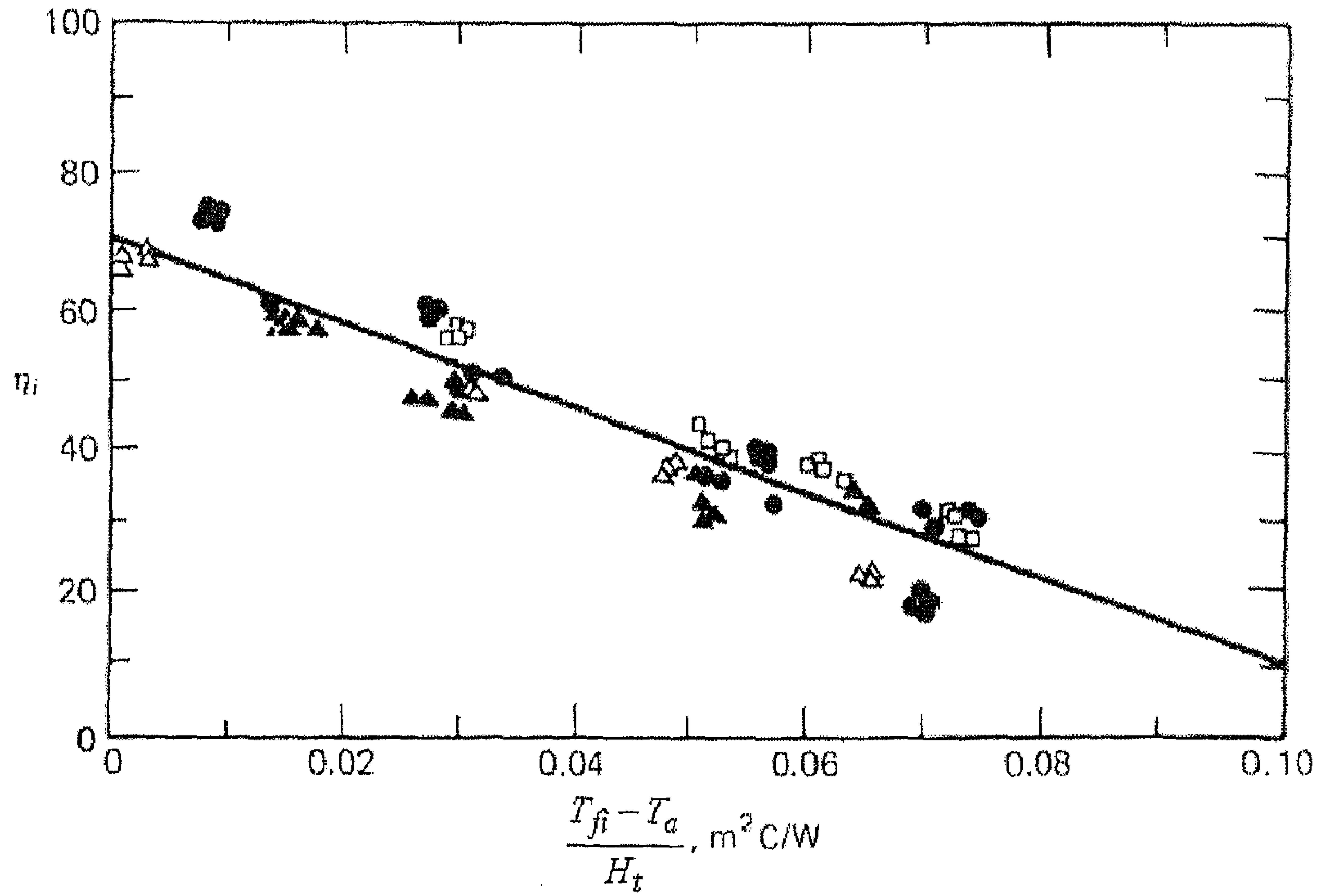
تتطلب المعايرة أيضاً إجراء حسابات الكفاءة لكل المعلومات المقاسة وتدون في جدول وكذلك تُمثل بيانياً. وتحسب الكفاءة على أساس المعادلة (54.3)، والتي تصبح على الصورة التالية:

$$\eta_c = F_R(\tau\alpha) - F_R U_c \frac{(T_{fi} - T_a)}{H_a} \qquad (76.3)$$

وترسم العلاقة بيانيا η_c بدلالة $\frac{(T_{fi} - T_a)}{H_a}$، وهذا الحد الأخير يُسمى بالشروط المناخية، ويكون الشكل الناتج خطاً مستقيماً. في الواقع أن U_c تتغير مع درجات حرارة تشغيل المجمع وكذلك تتغير حالة الطقس مع الزمن، وسوف يؤدي هذا إلى بعض الانحراف عن الخط المستقيم، في معظم حالات المجمعات الشمسية المستوية هذا الانحراف ليس ذا أهمية كبيرة. الشكل (21.3) يبين علاقة تجريبية نموذجية من نتائج تجربة (Simon, 1976).

شكل (19.3) منظومة اختبار المجمعات الشمسية المستوية لتسخين السوائل (Hill et al, 1976)

شكل (20.3) منظومة اختبار المجمعات الشمسية المستوية لتسخين الهواء،(Hill et al, 1976)



شكل (21.3) نتائج تجربة كفاءة مجمع مستوي لتسخين السوائل بغطاء زجاجي مفرد و صفيحة ماصة انتقائية. 60 نقطة المبينة لكل 5 تجارب لمدن مختلفة في الولايات المتحدة. الخط يمثل السمات النظرية المتحصل عليها من الحسابات تحت شروط التجربة. المصدر (Streed et al, 1979)

7.3 العوامل المؤثرة على أداء المجمعات الشمسية المستوية

يعرف أداء المجمع بكفاءة تجميعه للطاقة الشمسية ودرجة حرارة خروج المائع منه. وبطبيعة الحال، هناك العديد من العوامل التي تؤثر على أداء المجمع، يمكن تصنيف هذه العوامل إلى ثلاثة أصناف، كالتالي:

1. عوامل جوية
2. عوامل تصميم
3. عوامل تشغيل

وفيما يلي أثر كل عامل على أداء المجمع بالتفصيل.

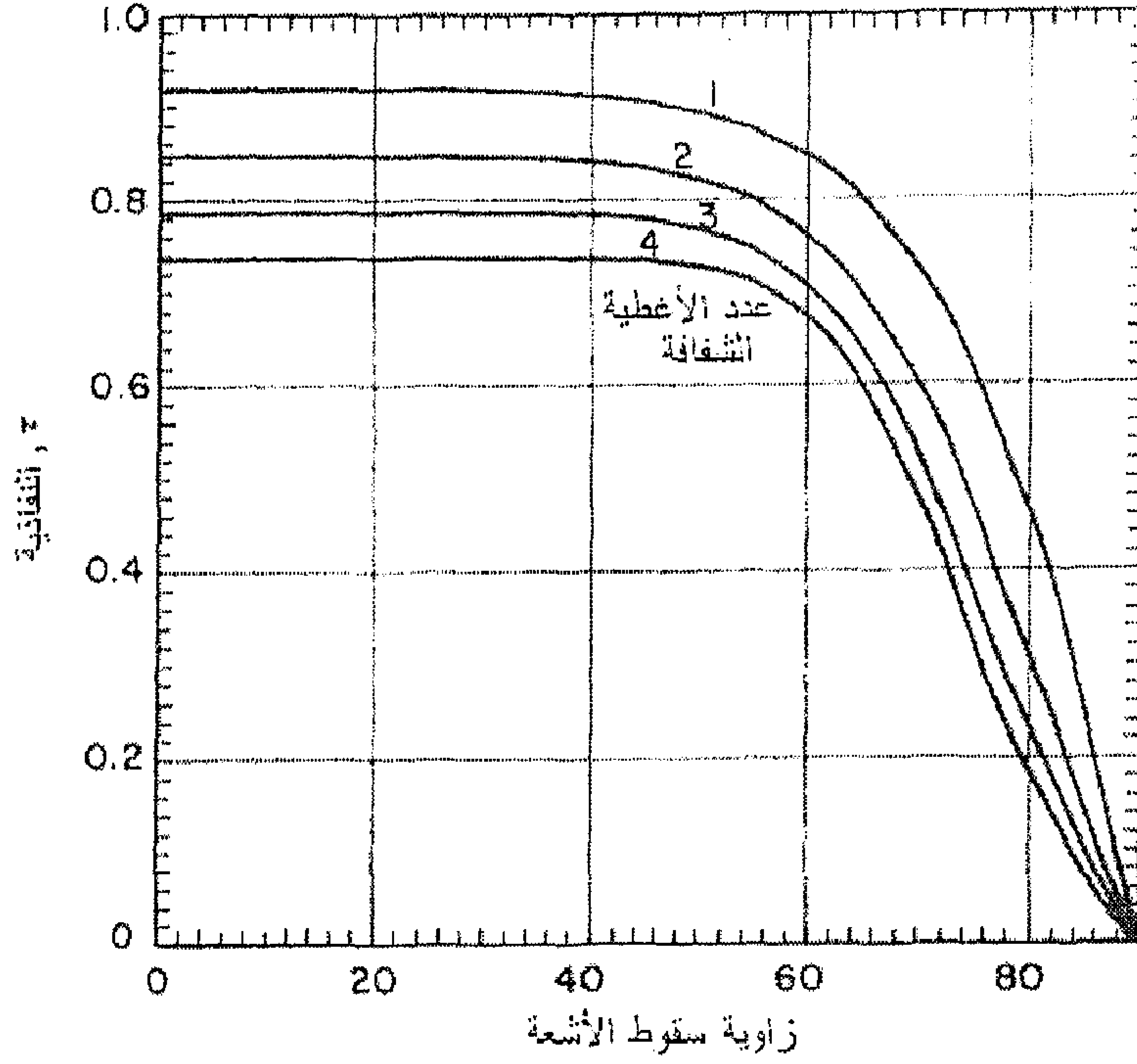
1.7.3 العوامل الجوية

إن أداء المجمع يتحسن بزيادة كل من الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الجو، كما هو واضح من الشكل (21.3)، بينما ينخفض أدائه بزيادة سرعة الرياح وذلك لتفاقم مركبة الفقد الحراري بالحمل في الفقد الحراري العلوي. كما أن احتواء الهواء على الغبار يؤثر في الأداء الحراري للمجمع الشمسي، أشار (Garg, 1974) إلى أن الغبار يقلل النفاذية بمعدل 8% لغطاء زجاجي مائل بزاوية 45°. لأخذ تأثير الغبار على المجمع بالحسبان, فانه يقترح خصم 1% من الإشعاع الشمسي الممتص من قبل الصفيحة الماصة للمناخ المعتدل، وبخصم 2% للمناخ الجاف المغبر.

2.7.3 العوامل التصميمية

تشمل العوامل التصميمية كلا من: نوع المجمع الشمسي، خصائصه البصرية، أبعاد وترتيب مكوناته. وتعتبر الأغطية الشفافة من أفضل الطرق لتقليل الفقد الحراري بالحمل نتيجة للرياح وخاصة في المناطق الباردة، ولكنه بإضافة الأغطية تقل النفاذية الكلية للنظام وهذا يقلل من شدة الإشعاع الشمسي الممتص من قبل الصفيحة الماصة. شكل (22.3) يبين علاقة نفاذية لعدد من الأغطية الشفافة غير الماصة بمعامل انكسار يساوي 1.526، بدلالة زاوية سقوط الأشعة الشمسية.

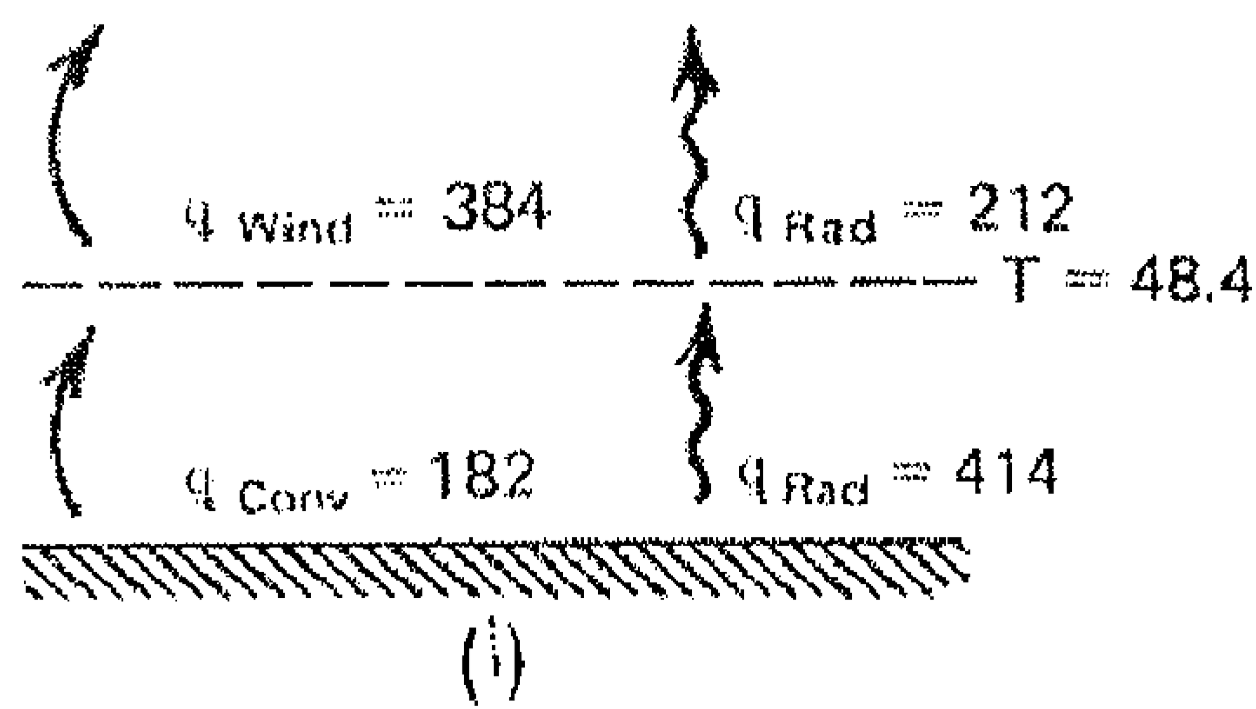
لتوضيح تأثير الخواص البصرية لعناصر المجمع على أدائه، نورد المقارنة المبينة في الشكل (23.3) لأشكال مختلفة من المجمعات الشمسية المستوية. معامل الفقد الحراري العلوي يمكن حسابه من المعادلة (33.3). للأشكال الأربعة المبينة للاستخدام العملي التجاري، يمكن الحصول الاستنتاجات العامة التالية:

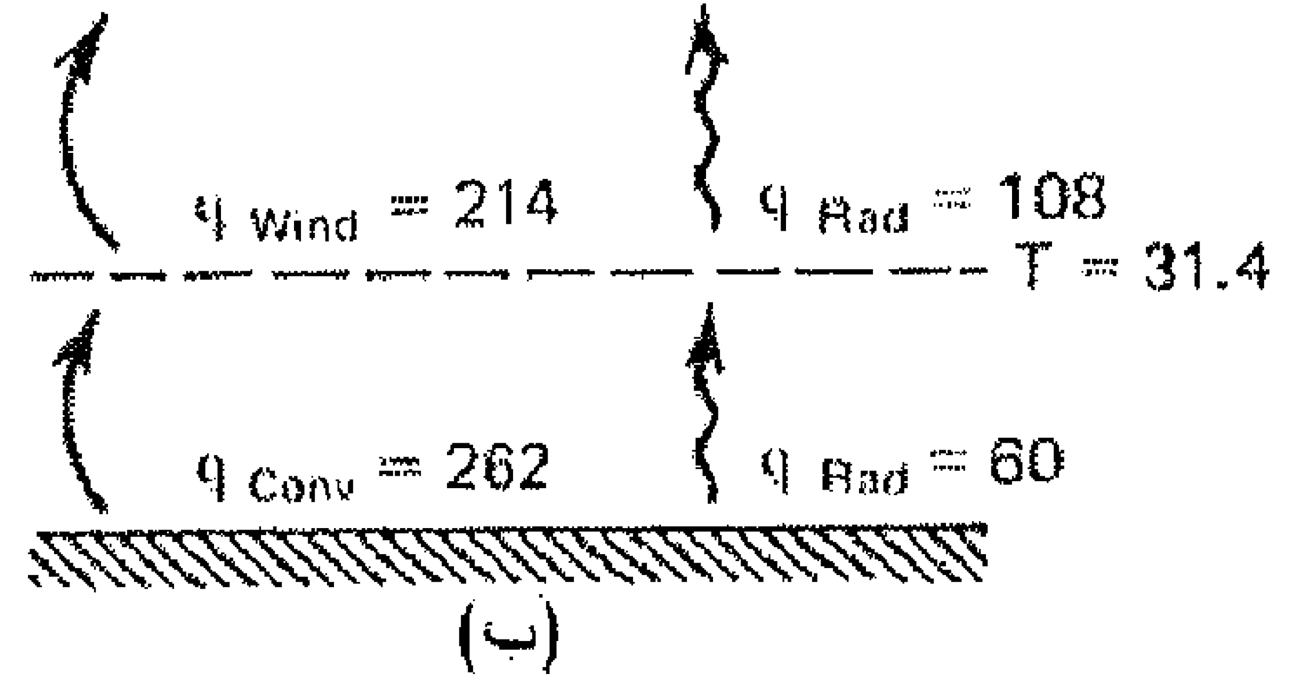


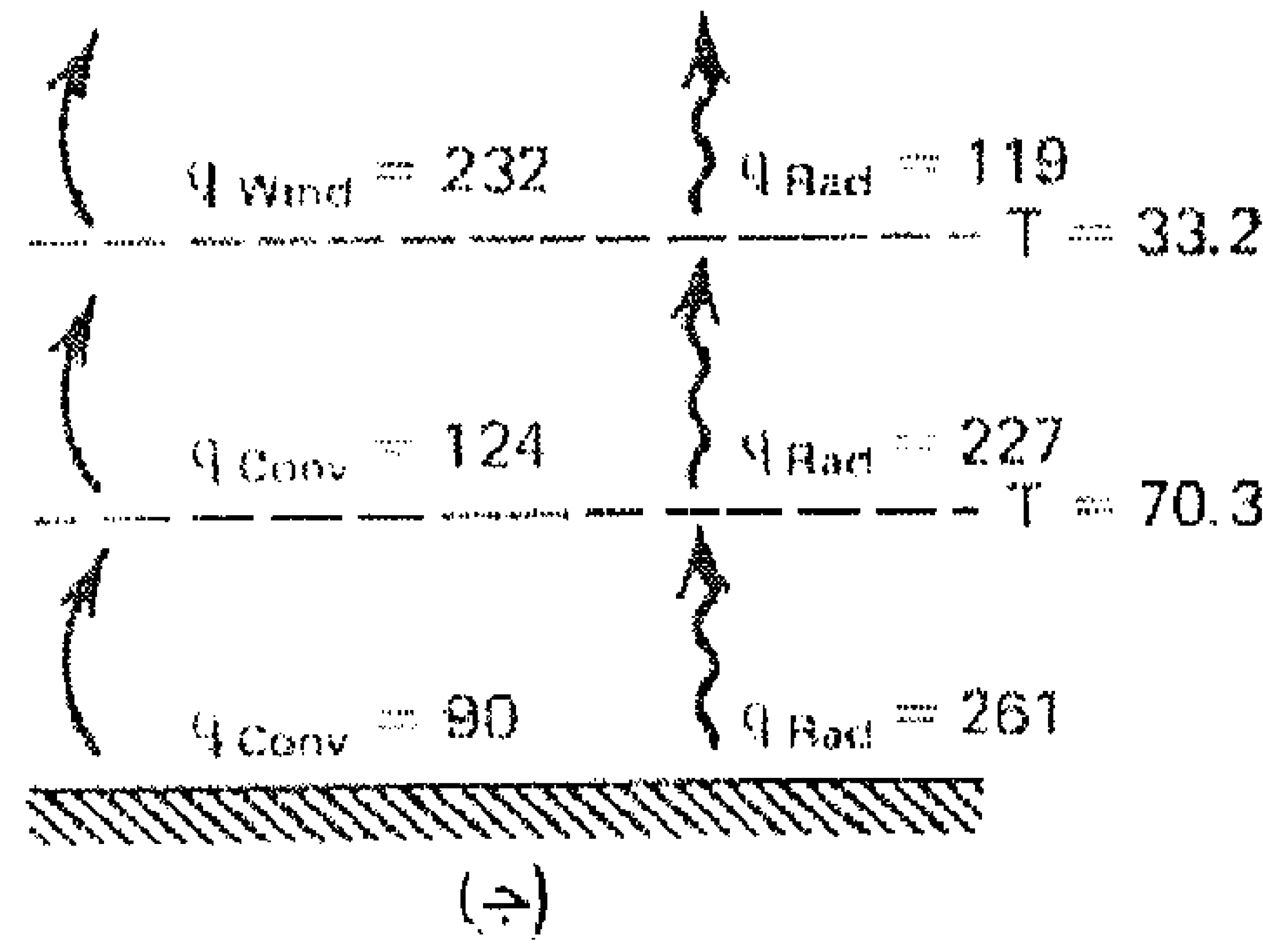
شكل (22.3) **نفاذية عدد 1، 2، 3، 4 أغطية شفافة غير ماصة بمعامل انكسار يساوي 1.526**

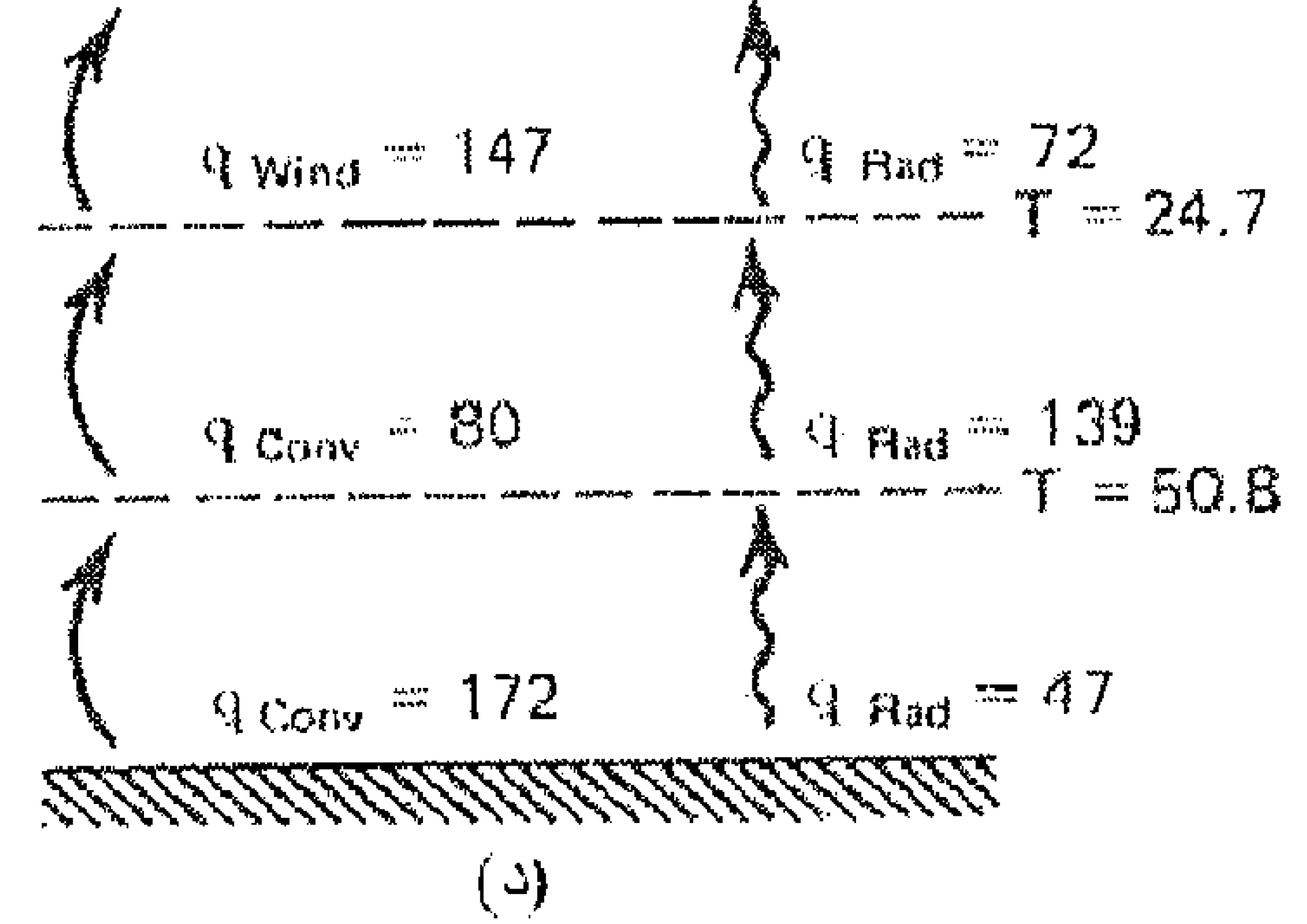
1. في حالة ما إذا كان للسطوح انبعاثية عالية $(\varepsilon \approx 1)$، فان فقد الحرارة بالإشعاع سيمثل النصيب الأكبر من الفقد الكلي.
2. في حالة ما إذا كانت الصفيحة الماصة لها انبعاثية منخفضة $(\varepsilon_p \approx 0.1)$، فان الفقد الحراري بالحمل سيكون أكثر أهمية من الفقد بالإشعاع. وبالتالي فالخطوة الأولى لتقليص انتقال الحرارة بين السطحين هي تغطية سطح انتقال الحرارة بطبقة قليلة الانبعاثية.
3. يمكن الحد من فقد الحرارة بالحمل والتوصيل بواسطة زيادة غطاء شفاف إضافي، والذي عادة ما يخفض أيضاً الفقد الحراري بالإشعاع. هذا العمل سوف يقلل الكفاءة البصرية للمجمع وبالتالي سينخفض أداء المجمع وخاصة عندما يكون فرق درجات الحرارة بين المائع والهواء الجوي قليل.

أما عن تأثير المسافة بين الصفيحة الماصـة والأغطيـة الشـفافة، فالواضـح أنـه وبصورة عامة، بزيادة المسافة تقلـل مـن الفاقـد الحـراري العلـوي. أمـا في بعـض المجمعات الهوائية والتي يمر فيهـا الهـواء بـين الصـفيحة الماصـة والغطـاء الزجـاجي (شكل 15.3-أ) فان زيادة المسافة سوف يقلل من سرعة الهواء في قناة مجرى الهواء وهذا سيقلل معامل انتقـال الحـرارة بالحمـل والـذي يعتـبر سـبب تسـخين الهـواء وبالتالي تقل درجة حرارته.









شكل (23.3) درجة حرارة الأغطية الشفافة والفواقد الحرارية العلوية لمجمع مستوي يعمل عند درجة حرارة الصفيحة الماصة $100^{\circ}\,C$ ودرجة حرارة الهواء الجوي ودرجة حرارة السماء تساوي $10^{\circ}\,C$، المسافات بين الأسطح $25\,mm$، زاوية ميل المجمع 45°، ومعامل انتقال الحرارة بالرياح $10\,W/m^2C$: (أ) غطاء واحد، انبعاثية الصفيحة الماصة = 0.95، $U_t = 6.6\,W/m^2C$; (ب) غطاء واحد، انبعاثية الصفيحة الماصة = 0.10، $U_t = 3.6\,W/m^2C$; (جـ) غطاء مزدوج، انبعاثية الصفيحة الماصة = 0.95، $U_t = 3.9\,W/m^2C$; (د) غطاء مزدوج، انبعاثية الصفيحة الماصة = 0.10، $U_t = 2.4\,W/m^2C$. كل حدود الفيض الحراري في الشكل بوحدة W/m^2.

3.7.3 العوامل التشغيلية

من أهم عوامل التشغيل تأثيراً على أداء المجمعات الشمسية هي: زاوية ميل المجمع، معدل تدفق ودرجة حرارة دخول المائع. ويعتبر معدل تدفق المائع $\dot{m}$ (لوحدة مساحة المجمع) العامل الرئيس في العوامل التشغيلية. كما تم بيانه سابقاً، ويؤدي زيادة معدل التدفق إلى تحسن ملحوظ الدلائل الحرارية التالية: معامل الإزاحة الحراري F_R، معامل الكفاءة F'، معامل الفقد الحراري الكلي U_c، والكفاءة η_c. ولكنه من جهة أخرى يؤدي إلى انخفاض حاد في معامل تسخين المائع F_T، وبالتالي انخفاض في درجة حرارة خروج المائع. إضافة إلى تحكم معدل التدفق في قدرة المضخة، قدرة المضخة W_p (لوحدة مساحة المجمع) يمكن حسابها من (Eldighidy, Taha, 1983)، كالتالي:

$$\left.\begin{aligned} W_p &= (\Delta p\, \dot{m})/(\rho_w\, \eta_p) \\ \Delta p &= \frac{1}{2}\rho_w\, v_w^2 \left[(K_{in} + K_{out}) + f\,\frac{L}{D_i} \right] \end{aligned}\right\} \qquad (77.3)$$

حيث: K_{in}، K_{out}، معاملات الفقد الداخل والخارج ولهما قيم 0.64، 1.5، على التوالي

η_p = الكفاءة الأيزنتروبيك للمضخة

ρ_w = كثافة الماء

v_w = سرعة الماء في الأنبوب

$$v_w = \frac{\dot{m}\, A_c}{\rho_w\, N_t\, \frac{\pi}{4} D_i}$$

حيث: N_t، عدد الأنابيب، A_c، مساحة المجمع الشمسي.

D_i = القطر الداخلي للأنبوب

f = معامل الاحتكاك ويساوي

للتدفق الرقائقي $f=\frac{64}{\text{Re}_D}$ ،

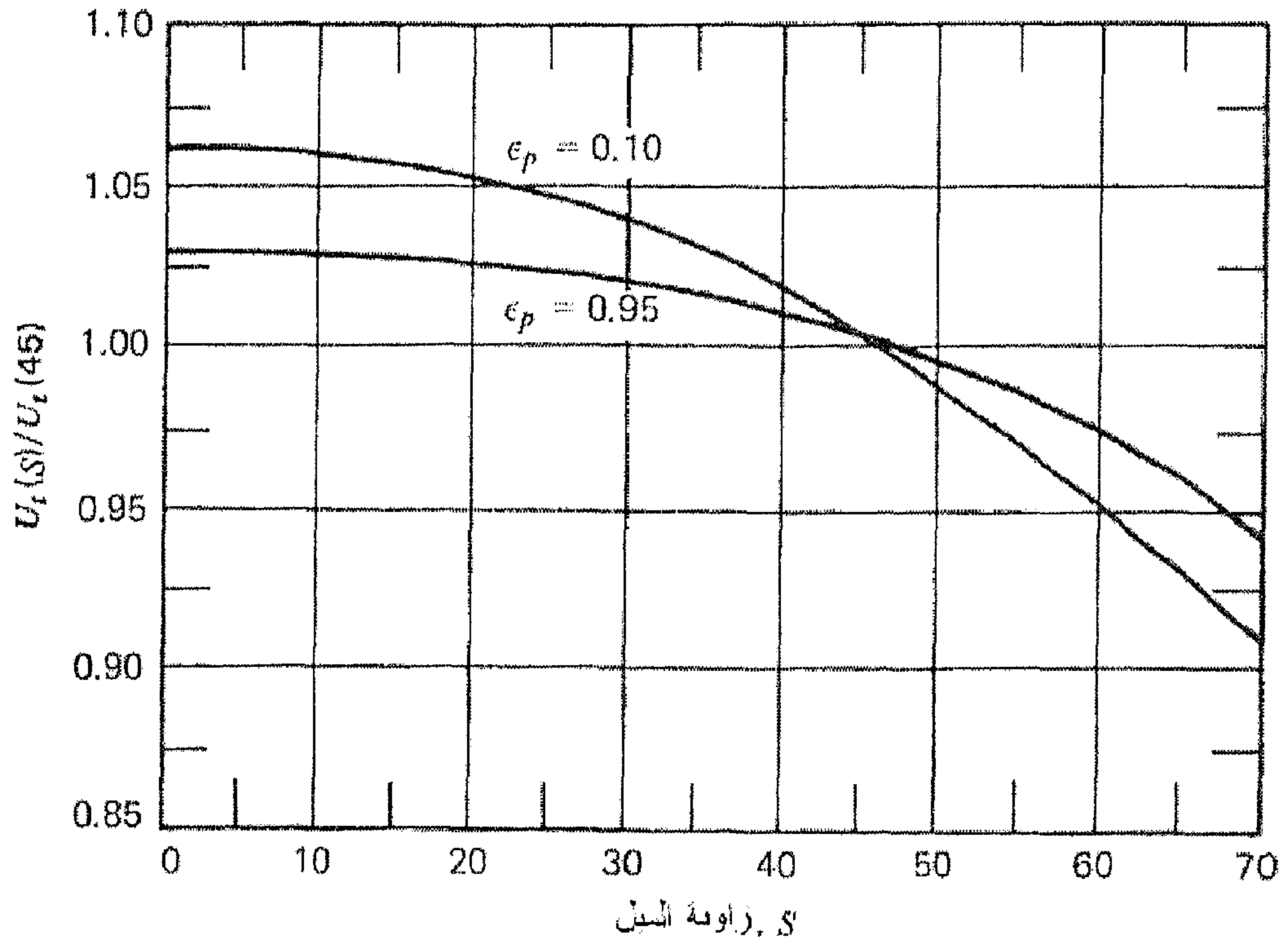
للتدفق المضطرب $f=0.316\,\text{Re}_D^{-0.25}$

Re_D ، عدد رينولد $\text{Re}_D=\frac{\rho_w D_i}{\nu_w}$ ، حيث ν_w ، اللزوجة الكينماتيكية للماء.

من هنا يكون واضحاً تأثير قطر الأنبوب على قدرة المضخة. بين تحليل (Eldighidy, Taha, 1983) أن قيمة تدفق $36\ \text{kg/m}^2\ \text{hr}$ يكون مثالياً للأنابيب الصغيرة الأقطار ومعدلات تدفق أكبر يمكن تبنيها لأقطار داخلية أكبر من $0.008\,\text{m}$. بينما بين (Nassar, 1999) أنه في المجمعات الشمسية الهوائية تكون القيمة المثالية لتدفق الهواء حوالي $29\ \text{kg/m}^2\ \text{hr}$. في كل الظروف لا يجوز تحديد معدل التدفق للمجمعات الشمسية، وذلك لأن المجمعات تكون متصلة مع أجهزة أخرى لتكون مجتمعة منظومة شمسية والتي يكون لها وظيفة محددة، لذا وجب دراسة السلوك الكلي للمنظومة تحت الظروف الحقيقية من العمل الوظيفي للمنظومة.

أمّا عن تأثير درجة حرارة دخول المائع إلى المجمع، فالشكل (21.3) يبين أن العلاقة عكسية بين درجة حرارة الدخول و الكفاءة، وتكون الكفاءة أعلى ما يمكن عند دخول المائع بدرجة حرارة الهواء الجوي. وكذلك الحال بالنسبة لباقي دلائل الأداء فكلها ترتفع بانخفاض درجة حرارة دخول المائع. إلا أنه تبعاً لذلك تنخفض درجة خروج المائع من المجمع.

الشكل (24.3) يوضح علاقة زاوية ميل المجمع الشمسي بمعامل الفقد الكلي للمجمع لصفيحة ماصة انتقائية $(\varepsilon_p=0.1)$ وأخرى عادية $(\varepsilon_p=0.95)$.



شكل (24.3) علاقة معامل الفقد الحراري العلوي مع زاوية ميل المجمع الشمسي

المراجع

1. ASHRAE Standard 93-77, *Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors*, American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers, New York (1977).

2. Close, D.J., Report E.D.7, Engineering Section, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Melobourne, Australia (1962). "Flat-Plate Solar Absorbers: The Production and Testing of Selective Surfaces for Copper Absorber Plates."

3. Duffie, J. A., Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Suns inc., 2nd edition, 1991.

4. Dunkle, R.V.., Cooper, P.I., *paper presented at the Los Angles Meeting of International Solar Energy Society* (1975). "A Proposed Method for the Evaluation of Performance Parameters of Flat-Plate Solar Collectors."

5. Eldighidy, S.M., Taha, I.S., *Solar Energy*, **31**, 455 (1983). "Optimum Mass Flow Rate of Water in a Flat-Plate Solar Collector Coupled with a Storage Tank and an Organic Rankine Cycle Loop."

6. Elsayed, M.M, Taha, I.S., Sabbagh, J.A., *Design of Solar Thermal Systems*, Scientific Publishing Center, King Abdulaziz University, Jeddah- Saudi Arabia Kingdom, (1984).

7. Garg, H.P., *Solar Energy*, **15**, 299 (1974). "Effect of Dirt on Transparent Covers in Flat-Plate Solar Energy Collectors."

8. Hamid, Y.H., Beckman, W.A., *Trans. ASME, J. Energy for Power*, **93**, 221 (1971). "Performance of Air-Cooled, Radiatively Heated Screen Matrices."

9. Hill, J.E., Streed, E.R., Kelly, G.E., Geist, J.C., Kusuda, T., *NBS Tech. Note*, 899 (1976). "Development of Proposed Standards for Testing Solar Collectors and Thermal Storage Devices."

10. Hill, J.E., Streed, E.R., *Solar Energy*, **18**, 421 (1976). "Method of Testing for Rating Solar Collectors Based on Thermal Performance."

11. Hottel, H.C. and Woertz, B.B., *Trans. ASME*, **64**, 91 (1942). "Performance of Flat-Plate Solar Heat Collectors."

12. Hottel, H.C., Unger, T.A., *Solar Energy*, **3** (3), 10 (1959). "The Properties of a Copper Oxide-Aluminum Selective Black Surface Absorber of Solar Energy."

13. Hottel, H.C., Whillier, A., *Trans. Of the Conference on the Use of Solar Energy*, Vol. **2**, P. I, 74, University of Arizona Press (1958). "Evaluation of Flat-Plate Collector Performance."

14. Hsieh, S. J., *Solar Energy Engineering*, Prentic-Hall, (1981).

15. Klein, S.A., *Solar Energy*, **17**, 79 (1975). "Calculation of Flat-Plate Loss Coefficients."

16. Kreith, F., Kreider, J.F., *Principles of Solar Engineering*, Hemisphere Publishing Corporation, USA, (1978).

17. McDonald, G.E., Solar Energy, 17, 119 (1975). "Spectral Reflectance Properties of Black Chrome for Use as a Solar Selective Coating."

18. Moore, S.W., in *AES Coatings for Solar Collectors Symposium*, American Electroplaters Society, Winter Park, FL (1976). "Photothermal Conversion of Solar Energy for Large-Scale Electrical Power Production."

19. Nassar, Y.F, *A Design Procedure of the Domestic Solar Heating Systems on the Base of Air-Heating Flat-Plate Solar Collector*, Ph.D. Theses, Moscow-Russia, (1999).

20. Nassar, Y.F., Sergievsky, E.D., *the Proceedings of the sixth international conference on advanced computational methods in heat transfer*, June 26-28 Madrid-Spain, 575 (2000)."Heat transfer in flat-plate solar air-heating collector."

21. Selcuk, K., *Solar Energy*, **13**, 165 (1971). "Thermal and Economic Analysis of the Overlapped-Glass Plate Solar-Air Heaters."

22. Simon, F.F., *Solar Energy*, **18**, 451 (1976). "Flat-Plate Solar Collector Performance Evaluation with a Solar Simulation as a Basis for Collector Selection and Performance Prediction."

23. Simon, F.F., *Solar Energy*, **18**, 451 (1976). "Flat-Plate Solar Collector Performance Evaluation with a Solar Simulator as a Basis for Collector Selection and Performance Prediction."

24. Streed, E.R., Hill, J.E., Thomas, W.C., Dawson, A.G., Wood, B.D., *Solar Energy*, **22**, 235 (1979). "Results and Analysis of a Round Robin Test Program for Liquid-Heating Flat-Plate Solar Collectors."

الفصل الرابع
مجمعات التركيز

1.4 مقدمة

تستخدم المركزات لتجميع الطاقة الشمسية لدرجات الحرارة المتوسطة $(170-100^{\circ}C)$ والمرتفعة $(>170^{\circ}C)$. المركزات الشمسية يمكن لها تجميع الطاقة الشمسية العابرة من خلال مساحة كبيرة تُسمى بمساحة فتحة المنفذ، وتركيزها في مساحة صغيرة، تُسمى مساحة المستقبل. النسبة بين المساحتين تعطي أكبر نسبة تركيز ممكنة، وعادة تُسمى بنسبة التركيز النظرية. هذه القيمة النظرية لا تتحقق دائماً لعدة أسباب والتي سوف تناقش فيما بعد. تتكون مجمعات التركيز من المُركز والسطح المستقبل أو الماص. المُركز يكون سطح عاكس للأشعة الشمسية الساقطة عليه، ويمكن أن يكون حوضاً على شكل قطع مكافئ (وهو يمثل المركزات الثنائية الأبعاد) أو على شكل صحن، مخروط أو هرم (كما في المركزات الثلاثية الأبعاد). العاكسات الثنائية الأبعاد يمكن أن تكون لها أشكال مختلفة بما في ذلك العاكسات المسطحة ـ الجاري على شكل حرف V، العاكسات الكروية كالقطع المكافئ المركب. الكاسرات مثل العدسات والتي يمكن استخدامها أيضاً لتركيز الأشعة الشمسية كالعاكسات تماماً. المستقبل يمكن أن يكون أنبوباً أو سطحاً مستوياً مرتبطاً بأنبوب يمر به مائع.

2.4 أنواع مجمعات التركيز

تبين الأشكال (1.4)، (2.4)، (3.4) بعض أنواع مجمعات التركيز. وتوضح

الأشكال أيضاً بعض أنواع العاكسات والمستقبلات. والتصاميم المبينة في الشكل (1.4) تنتمي إلى المركزات الثنائية البعد والتي تركز الأشعة الشمسية الساقطة على سطحه في البؤرة، والتي يمكن أن تكون على شكل سطح (أ، ب)، على شكل نقطة (جـ)، أو على شكل خط (د،هـ). والنوع المبين في الشكل (2.4) ينتمي إلى المركزات الثلاثية الأبعاد.، ولها بؤرة نقطية. وعاكسات المرايا المبينة في الشكل (3.4)، مصممة لأنظمة التتبع. الشكل (4.4) يبين نوعين من عدسات التركيز. للمزيد من المعلومات عن أنواع مجمعات التركيز راجع (Elsayed, et al., 1984).

3.4 تعريفات

التعريفات التالية مبينة في الشكل (5.4) لمركز القطع المكافئ المركب:

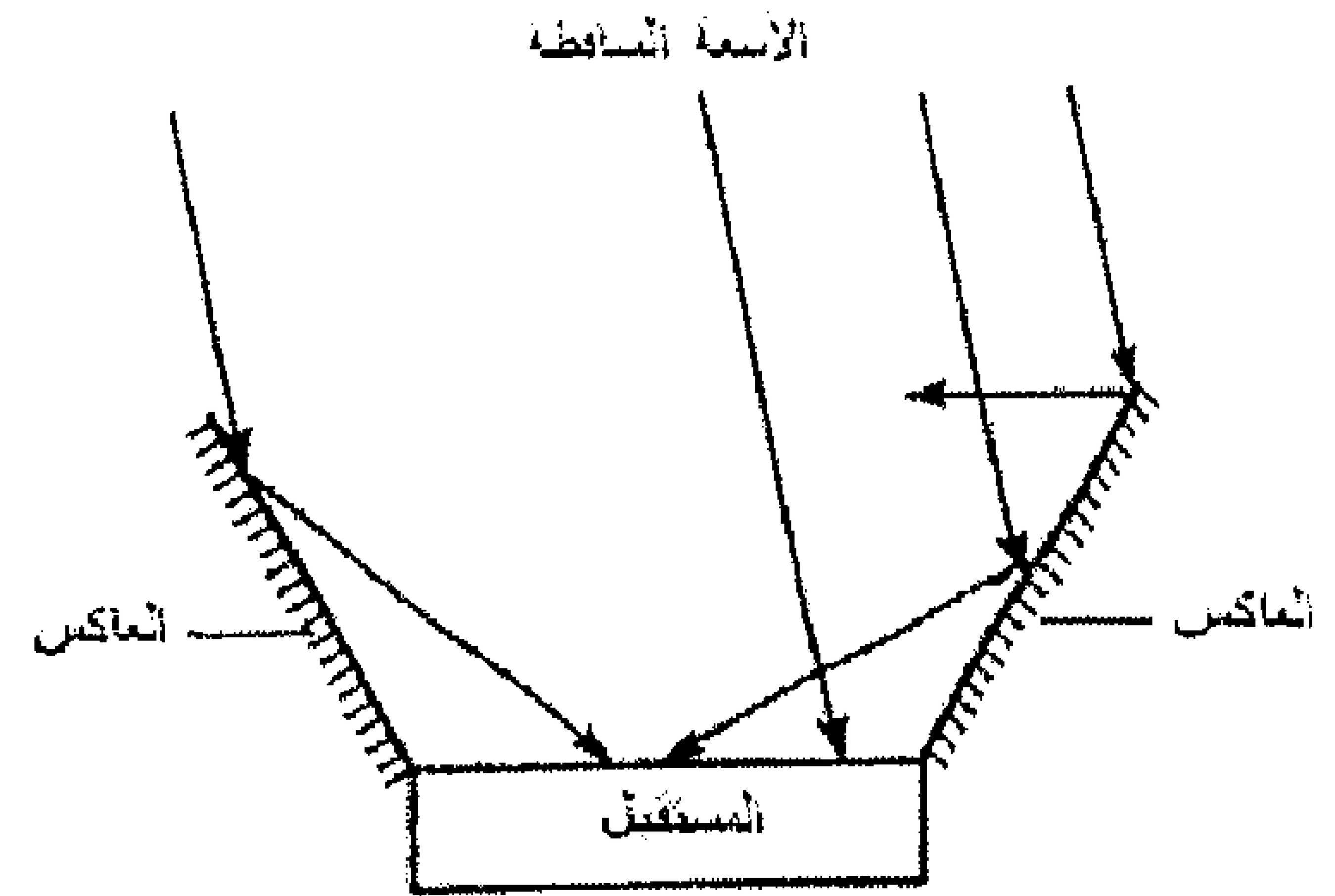
مساحة فتحة المنفذ (A_a): هي المساحة المتوفرة لدخول الأشعة الشمسية إلى العاكس أو الكاسر.

مساحة المستقبل (A_r): هي المساحة المتوفرة لاستقبال أو امتصاص الأشعة المركزة.

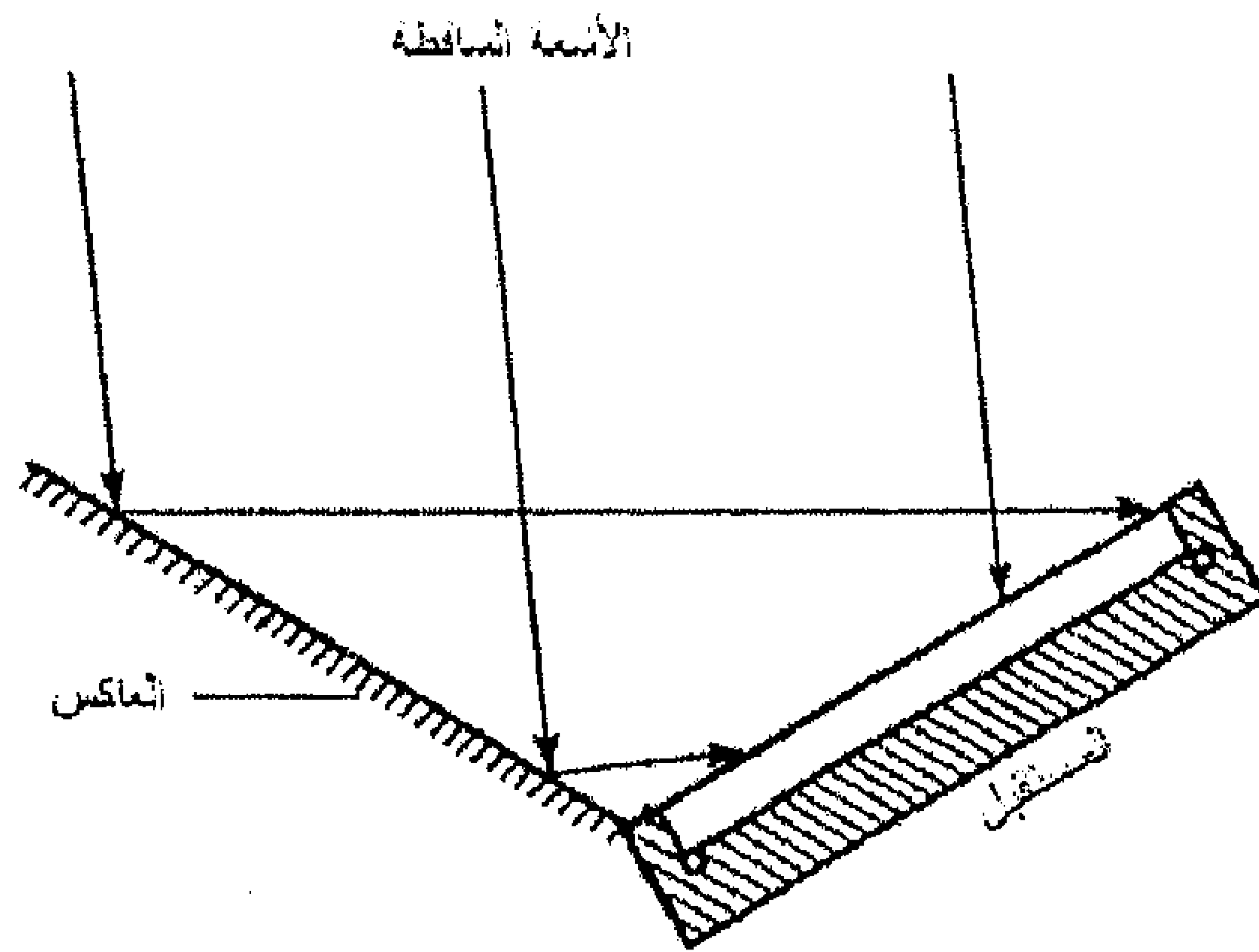
زاوية الاستقبال أو نصف زاوية الاستقبال (θ_a): هي الزاوية التي يمكن للمستقبل أن يرى من خلالها الأشعة الشمسية بدون تحريك جزء من أو كل المجمع. تسقط الأشعة الشمسية خلال هذه المنطقة الزاوية ثم تنعكس مرة أو أكثر حتى تصل في نهاية المطاف إلى المستقبل. ونصف زاوية الاستقبال هي نصف هذه الزاوية.

نسبة التركيز النظرية (C): هي النسبة بين مساحة فتحة المنفذ إلى مساحة المستقبل، أي أن:

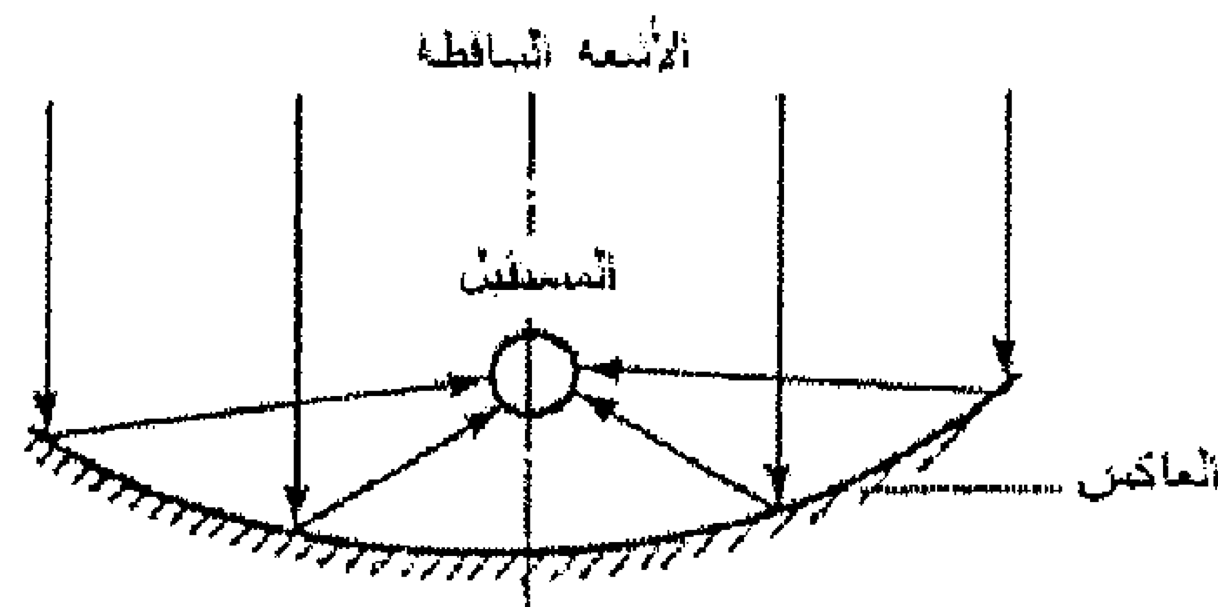
$$C = A_a / A_r \tag{1.4}$$



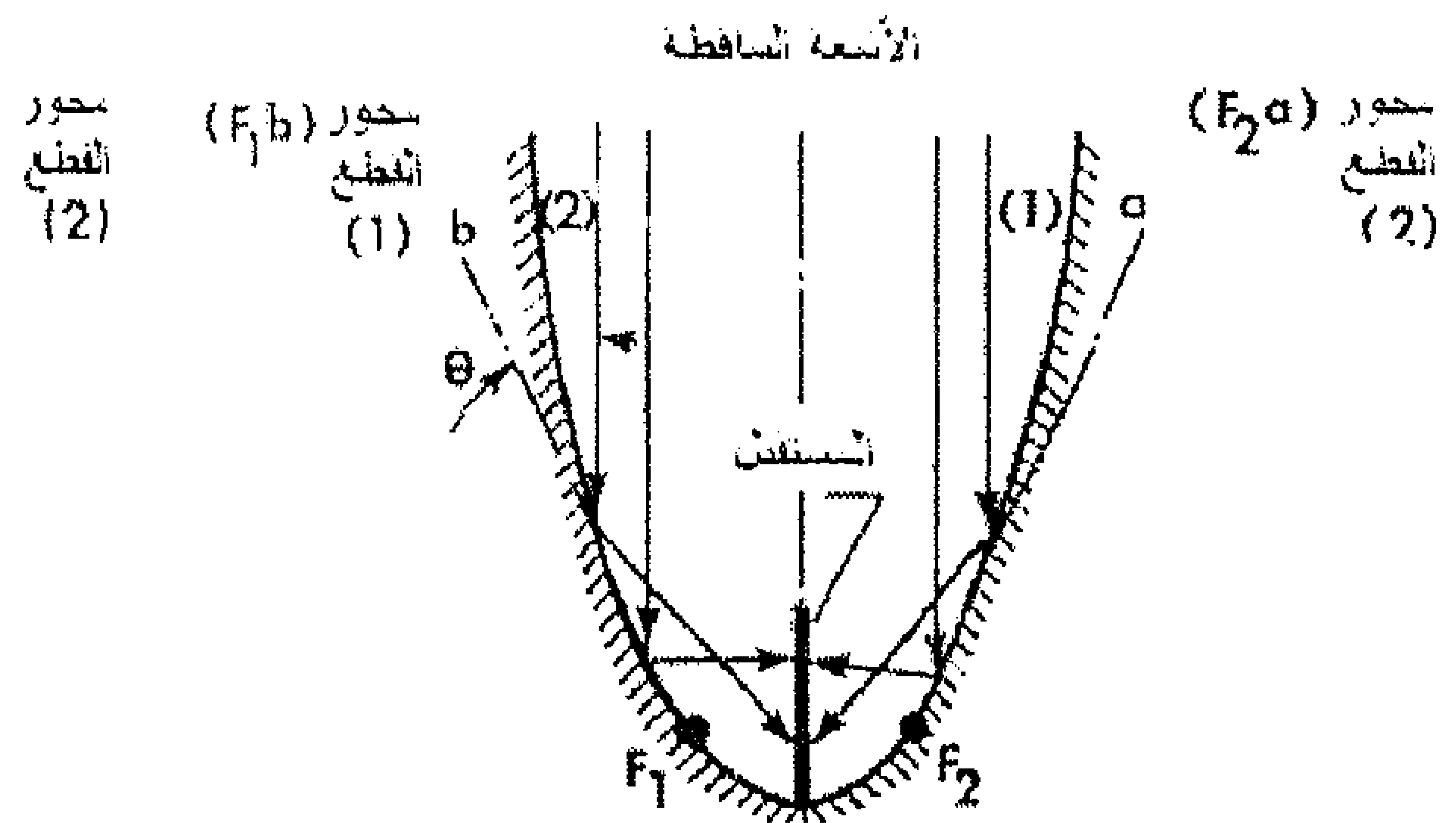
(ب) عاكس على شكل V - المستقبل مستوي



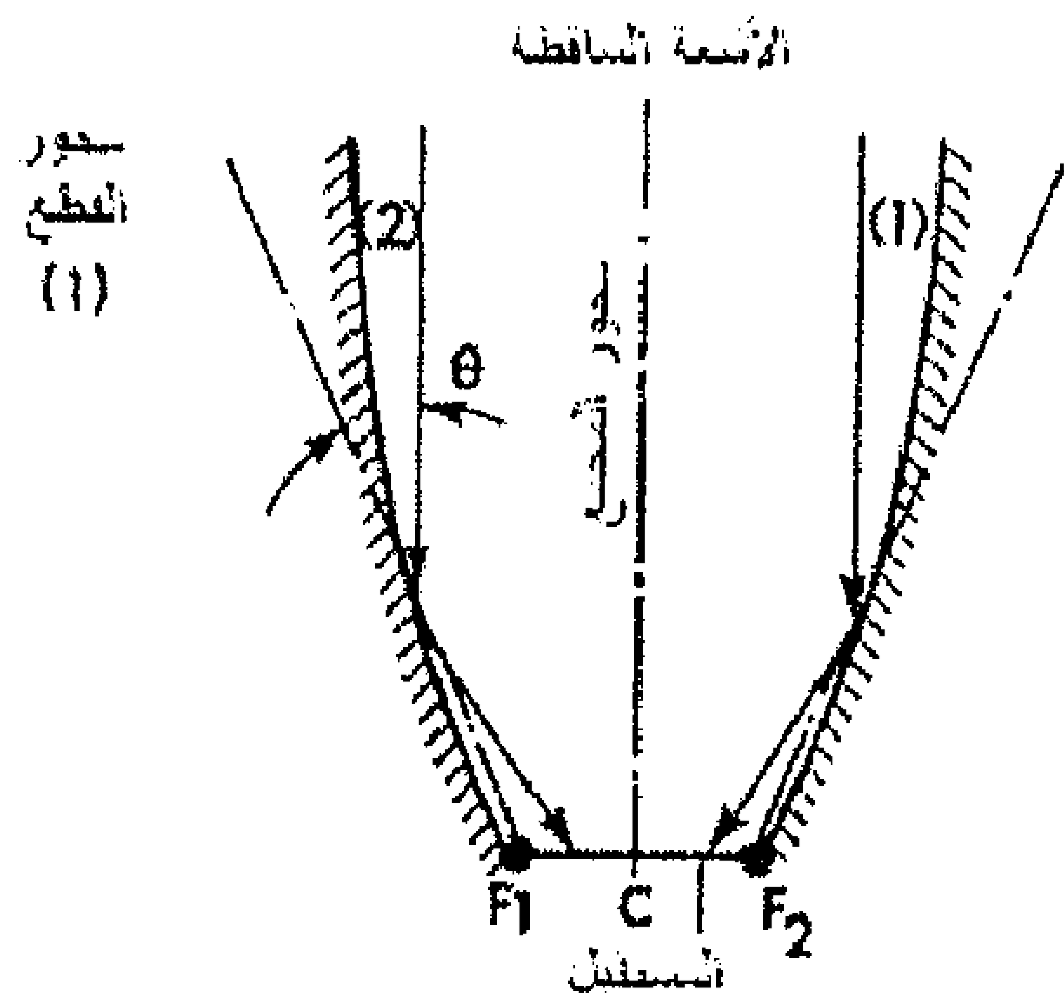
(أ) عاكس مستوى - المستقبل مستوى



(جـ) عاكس على شكل قطع مكافئ - المستقبل أنبوب

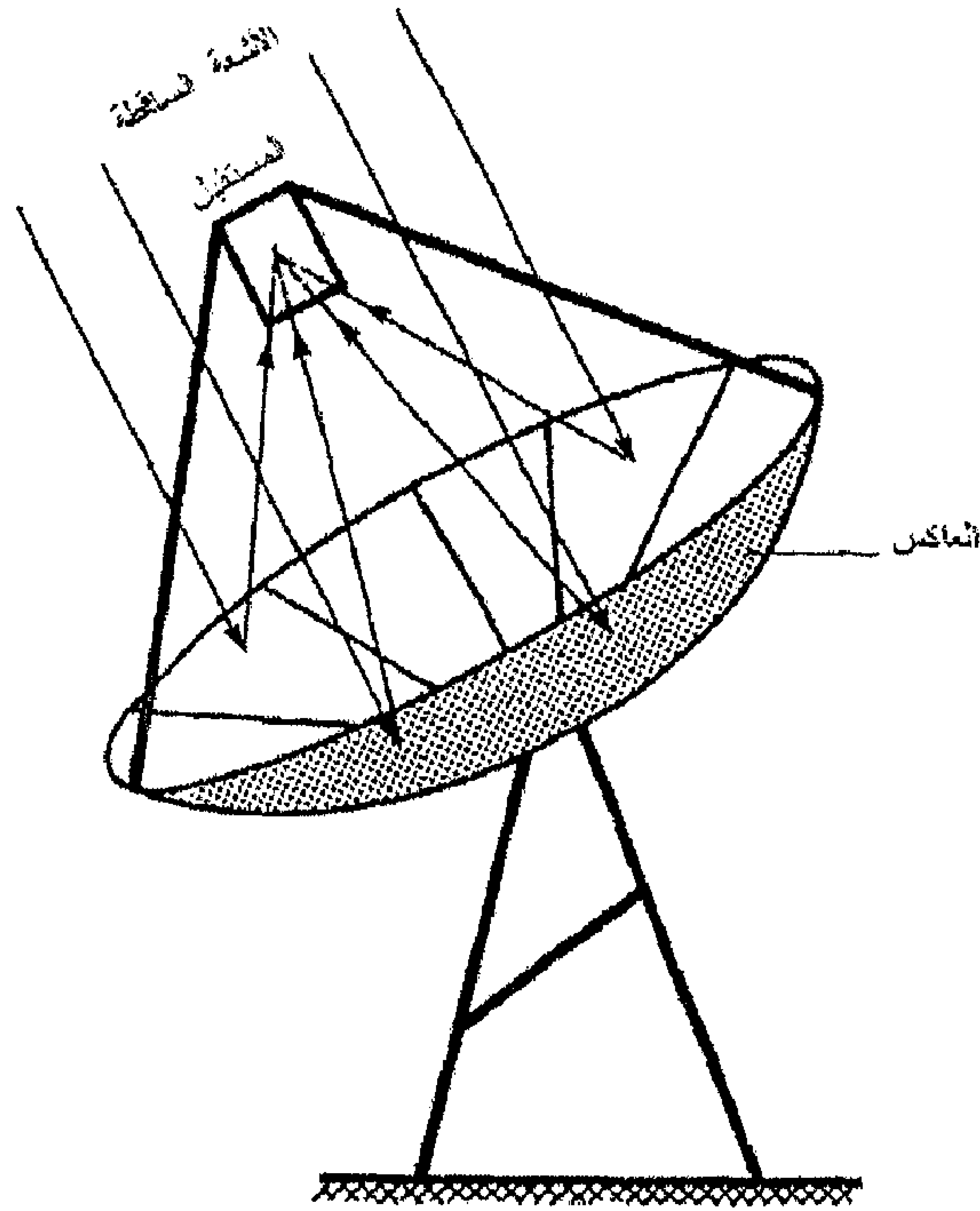


(هـ) مركز قطع مكافئ - المستقبل عمودي

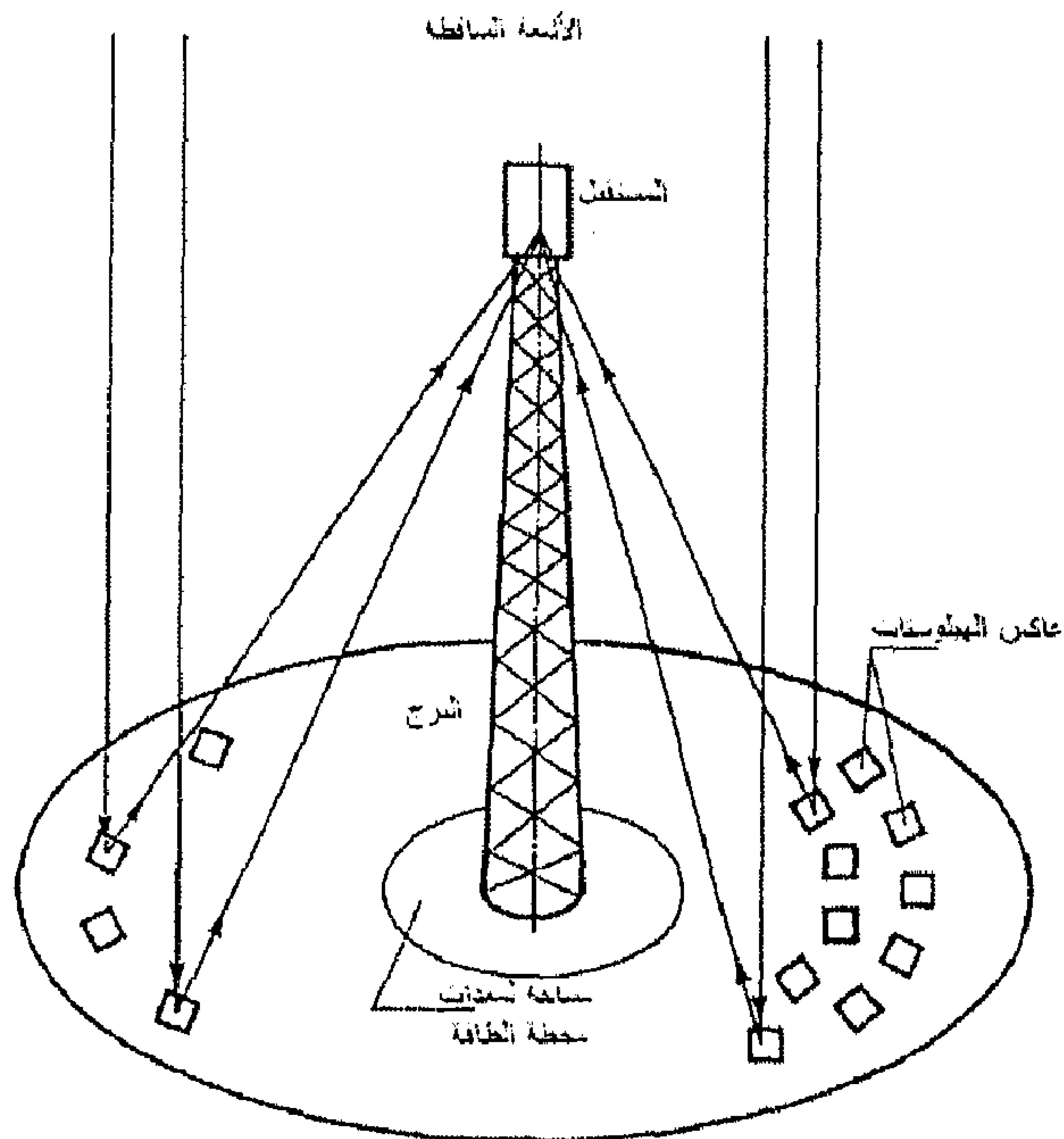


(د) مركز قطع مكافئ مركب - المستقبل أفقي

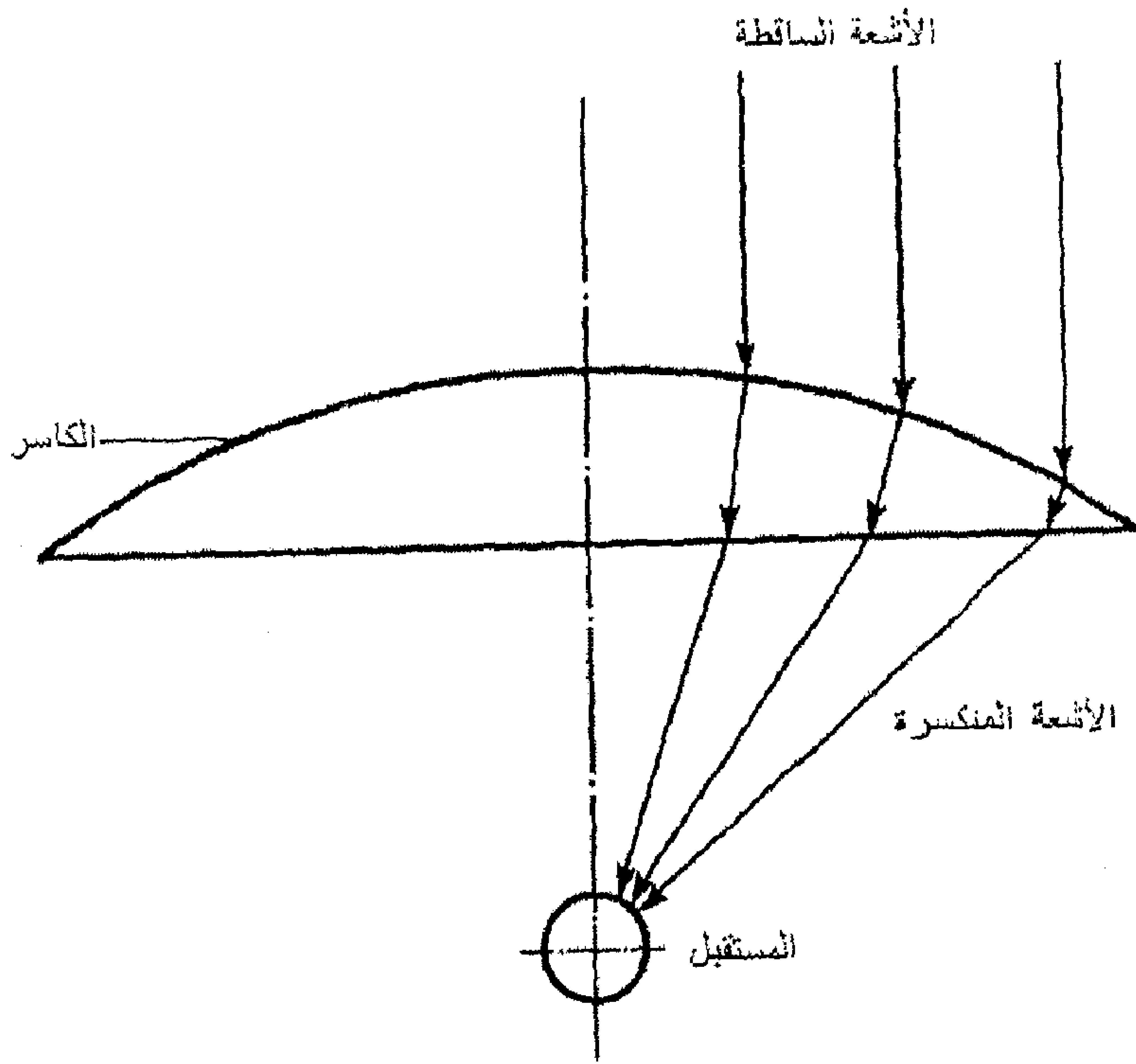
شكل (1.4) بعض أنواع مجمعات التركيز الثنائية الأبعاد



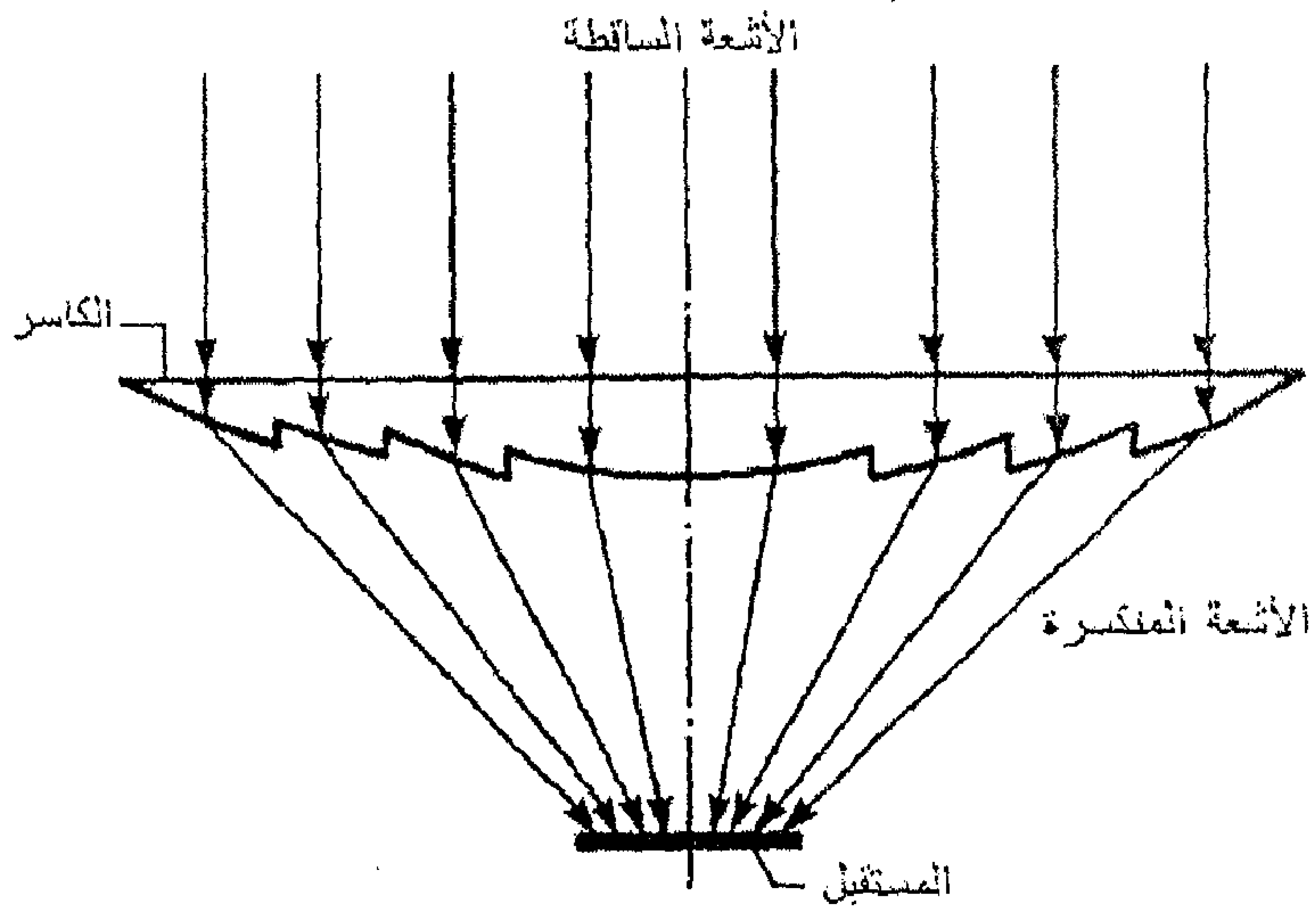
شكل (2.4) مجمع تركيز ثلاثي الأبعاد، العاكس على شكل صحن والمستقبل على شكل صندوق مجوف



شكل (3.4) مجمع تركيز على صورة حقل عاكسات الهليوستات والمستقبل على شكل صندوق مجوف

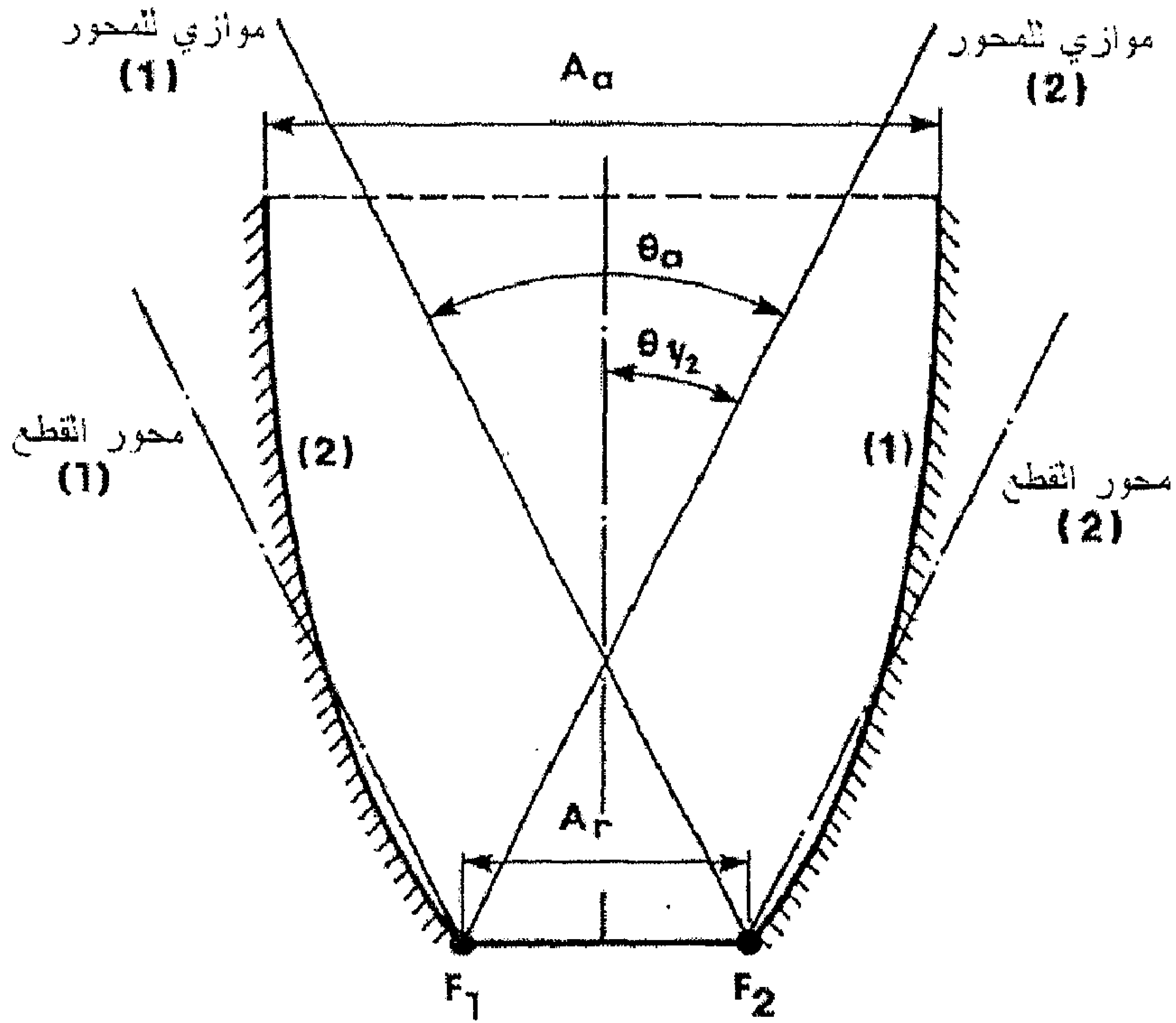


(أ) العدسات الكاسرة، والمستقبل أنبوبي



(ب) العدسات الكاسرة، والمستقبل مسطح

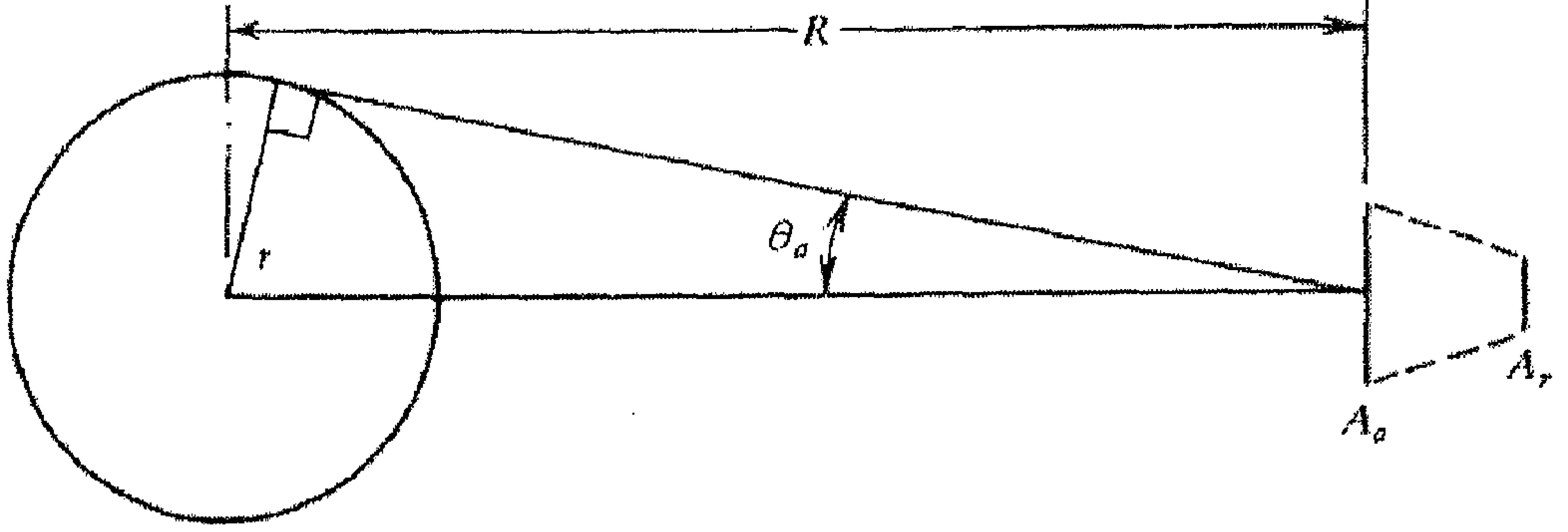
شكل (4،4) نوعان من المجمعات الكاسرة للأشعة الشمسية



شكل (5.4) رسم توضيحي لتعريف المصطلحات المستخدمة في مجمعات التركيز على شكل قطع مكافئ مركب

4.4 نسبة التركيز

نسبة التركيز لها نهاية عظمى تعتمد على ما إذا كان المُركز ينتمي إلى فئة ثنائية أو ثلاثية الأبعاد. الاقتراب التالي للحصول على نسبة التركيز العظمى من (Rabl, 1975)، على أساس القانون الثاني للديناميكا الحرارية، والتي طبقت على التبادل الحراري بالإشعاع بين الشمس والمستقبل. باعتبار مجمع تركيز دائري بمساحة فتحة المنفذ A_a، وبمساحة مستقبل A_r، يرى نصف قطر الشمس r عن مسافة R ، ونصف زاوية الاستقبال من الشمس θ_a، كالمبين في الشكل (6.4).



شكل (6.4) رسم تخطيطي لموضع المركز بالنسبة للشمس

فإذا كان المُركز مثالياً، فان الإشعاع الشمسي على مساحة فتحة المنفذ، هو ذلك الجزء من الأشعة المنبعثة من الشمس والمعترضة من قبل فتحة المنفذ. ولغرض التحليل يمكن اعتبار الشمس كجسم أسود بدرجة حرارة T_s، وبهذا فإنه يمكن كتابة كمية الحرارة المنبعثة من الشمس إلى سطح فتحة المنفذ كالتالي:

$$q_{s \to r} = A_a \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4 \qquad (2.4)$$

ولمستقبل مثالي (جسم أسود) يشع حرارة بمقدار $A_r\ \sigma T_r^4$ والجزء الذي يصل إلى الشمس هو E_{r-s}، فانه:

$$q_{r \to s} = A_r\ \sigma T_r^4\ E_{r-s} \qquad (3.4)$$

فعندما يتساوى T_r ,T_s، فإن القانون الثاني للديناميكا الحرارية يتطلب أن تكون $q_{s\to r}$ تساوي $q_{r\to s}$، ومن المعادلتين (2.4)، (3.4):

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} E_{r-s} \qquad (4.4)$$

ولما كانت أكبر قيمة للجزء E_{r-s} تساوي الواحد، فإن نسبة التركيز العظمى للمركزات الدائرية (ثلاثية الأبعاد) تكون:

$$\left(\frac{A_a}{A_r}\right)_{\text{circular, max}} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\sin^2\theta_a} = C_{\max,3\dim} \tag{5.4}$$

وبنفس التقريب فإنه يمكن الحصول على أقصى نسبة تركيز للمركزات الخطية (ثنائية الأبعاد)، وتكون النتيجة على الصورة التالية:

$$\left(\frac{A_a}{A_r}\right)_{\text{linear, max}} = \frac{R}{r} = \frac{1}{\sin\theta_a} = C_{\max,2\dim} \tag{6.4}$$

وحيث أن $\theta_a = 0.27°$، فإن أكبر تركيز ممكن للمركزات فئة الثلاثية الأبعاد سيكون 45,000، ولفئة الثنائية الأبعاد سيكون 212.

5.4 التحليل الحراري لمجمعات التركيز

التحليل الحراري للمركزات شبيه بذلك للمجمعات الشمسية المستوية، وهذه الأخيرة تمت مناقشتها في الفصل الثالث بالتفصيل. في هذا الجزء سيتم التحليل العام للتنبؤ بالنهايات العظمى لدرجات حرارة تصميم معين من مجمعات التركيز الشمسية (Winston, Hinterberger, 1975).

الاتزان الحراري الكلي للمركزات يصل بنا إلى المعادلة البسيطة المعروفة لحالة الاستقرار:

$$q_u = A_a\left(\eta_{opt} H_t\right) - A_r U_c \left(T_r - T_a\right) \tag{7.4}$$

وأيضاً يمكن تمثيل الطاقة المفيدة بمعادلة Hottel-Whillier-Bliss المعروفة للمجمعات الشمسية المستوية، على الصورة التالية

$$q_u = A_a F_R\left[H_a - \frac{A_r}{A_a} U_c \left(T_{fi} - T_a\right)\right] \tag{8.4}$$

حيث وللمعادلتين (7.4)، (8.4):

q_u = الطاقة المفيدة المكتسبة

A_a = مساحة فتحة المنفذ

A_r = مساحة سطح المستقبل

F_R = معامل الازاحة الحرارية

H_a = الطاقة الشمسية الممتصة من قبل المستقبل $H_a = \eta_{opt} H_t$

η_{opt} = الكفاءة البصرية للمجمع $\eta_{opt} = \tau \rho r \alpha$

τ = جزء الأشعة الساقطة التي تصل إلى العاكس

ρ = عاكسية العاكس

r = جزء الأشعة المنعكسة المعترضة بواسطة المستقبل

α = جزء الأشعة الممتصة من قبل المستقبل

H_t = الطاقة الشمسية الكلية (المباشرة والمنتشرة) الساقطة على وحدة مساحة فتحة المنفذ:

$$H_t = H_B + H_d$$

H_B = الأشعة المباشرة

H_d = الأشعة المنتشرة

T_r = متوسط درجة حرارة سطح المستقبل

U_c = معامل الفقد الحراري الكلي من المستقبل إلى الوسط المحيط على وحدة مساحة المستقبل

T_{fi} = درجة حرارة دخول المائع إلى المجمع

T_a = درجة حرارة الوسط المحيط

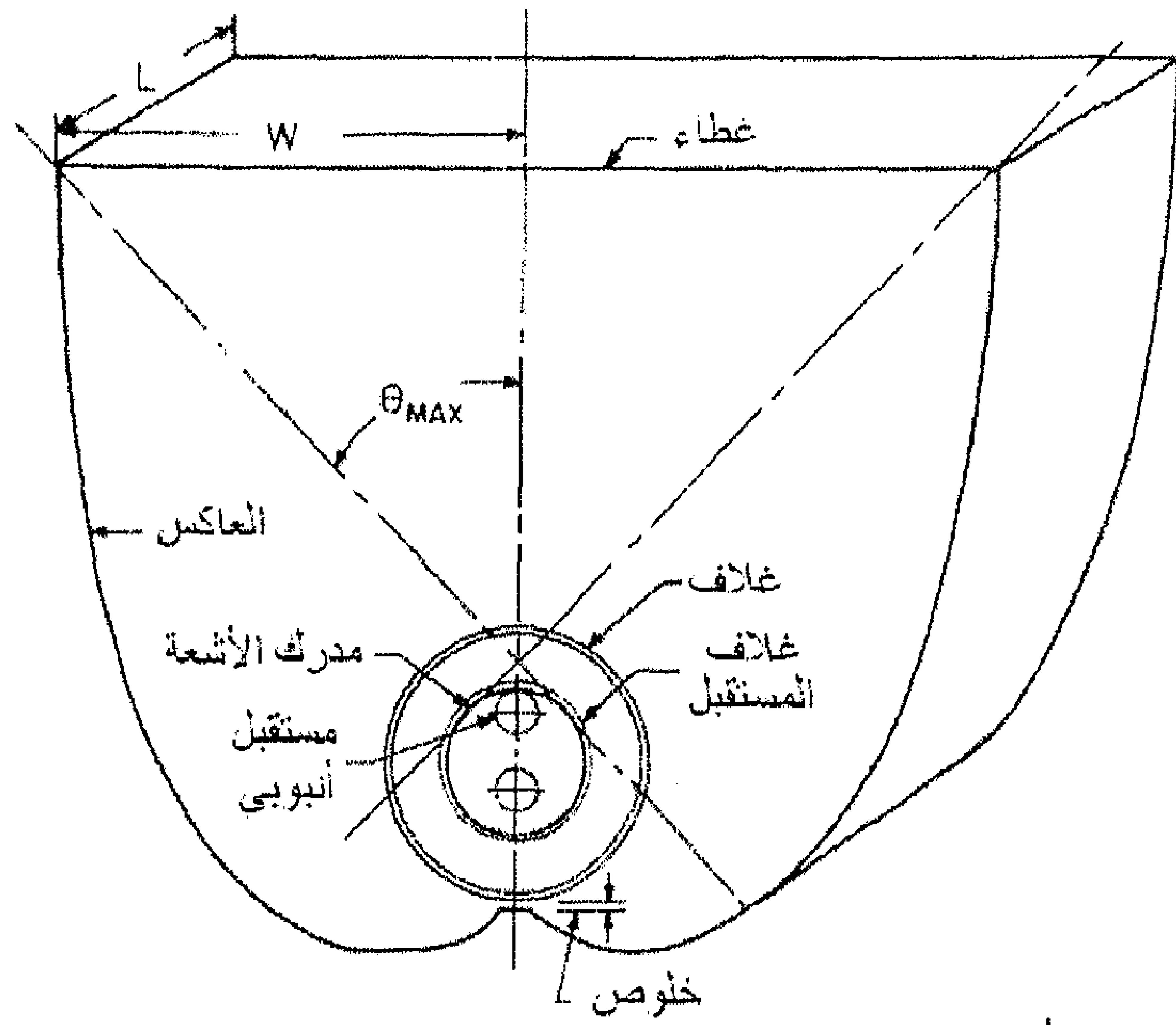
ولما كان للمجمعات الشمسية المركزة العديد من الأشكال لكل من المستقبل والعاكس، ولكل حالة لها تحليل حراري خاص بها، سيتم في هذا الجزء توضيح التحليل الحراري لمركزات القطع المكافئ المركب بالتفصيل.

إن إيجاد معامل الفقد الحراري الكلي U_c للمركزات له أهمية كبيرة للتقييم الحراري لهذه المجمعات الشمسية. حسابات معامل انتقال الحرارة الكلي يجب أن يتضمن أنماط انتقال الحرارة المختلفة: الفقد بالإشعاع، بالحمل وبالتوصيل للشكل المحدد من المجمعات الشمسية. أساسيات تحديد U_c لمجمعات التركيز الشمسية هي نفسها للمجمعات الشمسية المستوية. كما هو مبين في الشكل (7.4)، باعتبار مستقبل أنبوبي طويل ومغطي بغطاء زجاجي أنبوبي، المسافة الفاصلة بين الأنبوبين مفرغة. الأنبوب المستقبل بمساحة سطحية A_r . الغطاء الزجاجي بمساحة A_c ومعرضة للظروف الجوية الخارجية، درجة حرارة الهواء الجوي وسرعة رياح. وبما أن المسافة الفاصلة بين الأنبوبين مفرغة، فانه لا يوجد انتقال حرارة بالحمل خلال الفراغ، وتنتقل الحرارة عن طريق الإشعاع بمعامل h_{rrc} بين المستقبل والغطاء المتحدي المحور، وبهذا يكون معامل الشكل F_{rc} يساوي الواحد، (وفي حالة عدم التفريغ فانه يجب اعتبار انتقال الحرارة بالحمل، لمثل هذه الحالة أنظر (Tabor, 1958). معامل انتقال الحرارة بالإشعاع h_{rca} بين الغطاء الزجاجي والوسط المحيط. معامل انتقال الحرارة بالحمل h_{cca} بين الغطاء الزجاجي والوسط المحيط. وشبكة المقاومات الحرارية يمكن تمثيلها كالتالي: المقاومة الحرارية $(A_c\, h_{cca})^{-1}$ و $(A_c\, h_{rca})^{-1}$ على التوازي، ومحصلتهما متصلة على التوالي مع المقاومة الحرارية $(A_r\, h_{rrc})^{-1}$. وبذلك تكون المقاومة الكلية المكافئة على النحو التالي:

$$\frac{1}{A_r\, U_c} = R_e = \frac{1}{A_c\left(h_{cca} + h_{rca}\right)} + \frac{1}{A_r\, h_{rrc}}$$

أو:

$$U_c = \left[\frac{A_r}{A_c\left(h_{cca} + h_{rca}\right)} + \frac{1}{h_{rrc}}\right]^{-1} \qquad (9.4)$$



شكل (7.4) رسم تخطيطي لمجمع تركيز اسطواني أنبوبي

الأجراء يتضمن إيجاد درجة حرارة الغطاء الزجاجي T_c (والتي يمكن أن تكون تحت هذه الظروف التشغيلية أقرب من T_a منها إلى T_r)، وذلك عن طريق إجراء اتزان حراري للغطاء الزجاجي. بإهمال الإشعاع الشمسي الممتص من قبل الغطاء الزجاجي، فان معادلة الاتزان الحراري يمكن صياغتها على الصورة:

$$A_c\left(h_{cca}+h_{rca}\right)\left(T_c-T_a\right)=A_r\,h_{rrc}\left(T_r-T_c\right)$$

وبهذا فان درجة حرارة الغطاء الزجاجي تكون:

$$T_c=\frac{A_c\left(h_{cca}+h_{rca}\right)T_a+A_r\,h_{rrc}\,T_r}{A_c\left(h_{cca}+h_{rca}\right)+A_r\,h_{rrc}} \qquad (10.4)$$

معامل الإزاحة الحرارية، F_R، يُعرف بأنه نسبة الطاقة المفيدة المكتسبة الحقيقية للمجمع الشمسي إلى الطاقة المفيدة المكتسبة في حالة ما إذا كان كل سطح المستقبل

يعمل عند درجة حرارة تساوي درجة حرارة دخول المائع للمجمع. قياساً للمعادلة (52.3) للمجمعات الشمسية المستوية، فان معامل الإزاحة الحرارية للمجمعات الشمسية المركزة يُعطى بالعلاقة التالية:

$$F_R = \frac{\dot{m}\, c_p}{A_r\, U_c}\left[1 - \exp\left(-\frac{A_r\, U_c\, F'}{\dot{m}\, c_p}\right)\right] \tag{11.4}$$

حيث: $\dot{m}$ = معدل تدفق المائع خلال المجمع

c_p = الحرارة النوعية للمائع

F' = معامل كفاءة المجمع

معامل الكفاءة للمجمع، F'، تُعرف بأنها نسبة المقاومة الحرارية بين سطح المستقبل والهواء الجوي إلى المقاومة الحرارية بين المائع والهواء الجوي. وهي على النحو التالي:

$$F' = \frac{1/A_r\, U_c}{1/A_r\, U_c + R_f} \tag{12.4}$$

حيث R_f، المقاومة الحرارية بين المائع وسطح المستقبل.

في حالة المستقبل الأنبوبي الأسطواني بقطر داخلي، D_i، وخارجي، D_o، ويتدفق المائع في داخل الأنبوب بمعامل انتقال حراري بالحمل h_{ci}، فان المقاومة الحرارية بين المائع وسطح المستقبل تُعطى بالعلاقة:

$$R_f = \frac{1}{h_{ci}\, \pi\, D_i\, L} + \frac{\ln D_o/D_i}{2\pi\, k\, L} \tag{13.4}$$

حيث: k = الموصلية الحرارية لمادة الأنبوب

L = طول الأنبوب

بالتعويض في المعادلة (12.4) عن قيمة R_f، فان معامل الكفاءة للمجمع يصبح:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_c}}{\frac{1}{U_c} + \frac{D_o}{h_{ci} D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k}} \qquad (14.4)$$

وبهذا يكون معامل التدفق للمجمع F'' على الصورة:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} c_p}{A_r U_c F'}\left[1 - \exp\left(-\frac{A_r U_c F'}{\dot{m} c_p}\right)\right] \qquad (15.4)$$

أما الفرق بين المستقبلات المغطاة والغير مغطاة فيكمن فقط في حساب H_a، U_c.

الكفاءة اللحظية للمجمعات الشمسية المركزة، η_c، تُعرف بأنها نسبة الطاقة المفيدة المكتسبة إلى الطاقة الشمسية الكلية الساقطة على مستوى فتحة المنفذ:

$$\eta_c = \frac{q_u}{A_a H_t} \qquad (16.4)$$

بتعويض المعادلة (7.4) في المعادلة (16.4)، ينتج أن:

$$\eta_c = \eta_{opt} - \frac{U_c (T_r - T_a)}{C H_t} \qquad (16.4)$$

أو بدلالة معامل الإزاحة الحرارية، F_R:

$$\eta_c = \left[F_R \eta_{opt} - \frac{F_R U_c}{C} \frac{(T_{fi} - T_a)}{H_t}\right] \qquad (17.4)$$

سبق وأن ناقشنا أقصى نسبة تركيز نظرية وتحدث عند أقصى درجة حرارة لسطح المستقبل، بالقانون الثاني للديناميكا الحرارية يساوي درجة حرارة الشمس. عند درجة الحرارة تلك، لا توجد طاقة مفيدة مكتسبة من المجمع. الطريقة الوحيدة لمعرفة النهاية العملية لدرجة حرارة المستقبل، هي بفرض متغيرات المجمع التالية:

η_{opt}، η_c، ومتغيرات التشغيل H_t، T_a. وبفرض أن المستقبل يفقد الحرارة بواسطة الإشعاع فقط، وبإهمال الفواقد الأخرى بالحمل والتوصيل، فانه:

$$U_c\left(T_r - T_a\right) = \varepsilon_r\, \sigma \left(T_r^4 - T_a^4\right) \tag{18.4}$$

بتبني القيم التالية للمتغيرات الجوية والتشغيلية للمجمع:

$$\eta_c = 0.57$$

$$\eta_{opt} = 0.70$$

$$H_t = 1000\, W/m^2$$

$$T_a = 310\, K$$

وبالتعويض في المعادلات (16.4)، (18.4) وبتجميع الحدود للحصول على العلاقة التالية:

$$T_r^4 = \frac{\left(\eta_{opt} - \eta_c\right) C\, H_t}{\varepsilon_r\, \sigma} + T_a^4 \tag{19.4}$$

$$= \frac{0.2 \times 1000}{5.67 \times 10^{-8}} \frac{C}{\varepsilon_r} + (310)^4$$

وبارتفاع درجة حرارة المستقبل، فإن الانبعاثية تصل إلى قيمة الامتصاصية للأشعة الشمسية. هذه حقيقة، حيث أن طيف الطاقة المنبعثة يصل إلى طيف الإشعاع الشمسي. وبهذا، فمن المناسب فرض قيمة ε_r مساوية 0.9.

والآن باعتبار الحالتين، الثنائية والثلاثية البعد لمجمعات شمسية مركزة. فانه وللمركزات الثنائية الأبعاد $C_{\max} = 212$، فإن أقصى درجة حرارة للمستقبل تكون:

$$T_{r,\max} = \left[\frac{0.2 \times 1000}{5.67 \times 10^{-8}} \frac{212}{0.9} + (310)^4\right]^{1/4} = 957\ K$$

وللمركزات الثلاثية الأبعاد يكون $C_{max} = 45{,}000$، فان أقصى درجة حرارة للمستقبل تصبح:

$$T_{r,\max} = \left[\frac{0.2\times1000}{5.67\times10^{-8}}\frac{45{,}000}{0.9}+(310)^4\right]^{1/4} = 3644\ K$$

مثال 1.4

مجمع تركيزي من نوع القطع المكافئ الاسطواني بطول $10\,m$، وعرض فتحة المنفذ $2.4\,m$. فإذا كان المستقبل عبارة عن أنبوبة فولاذية بقطر خارجي $5\,cm$، وبقطر داخلي $4\,cm$ وغلفت الأنبوبة باسطوانة زجاجية مفرغة بقطر $8\,cm$. أحسب:

(أ) معامل الفقد الحراري الكلي للمستقبل؛

(ب) الطاقة المفيدة المكتسبة في مجمع تركيز بالمواصفات التالية:

1. الطاقة الشمسية الممتصة $H_a = 400\,W/m^2$ لكل وحدة من مساحة فتحة المنفذ؛
2. سطح المستقبل هو مادة سوداء غير انتقائية بانبعاثية $\varepsilon_r = 0.90$، وبدرجة حرارة $T_r = 240^\circ C = 513\ K$؛
3. انبعاثية الغطاء الزجاجي $\varepsilon_c = 0.88$؛
4. المائع العامل بسعة حرارية $c_p = 1340\ J/kg.K$، ويدخل المستقبل بدرجة حرارة $T_{f,in} = 200^\circ C$؛ وبمعدل تدفق $\dot{m} = 0.10\ kg/s$؛
5. معامل انتقال الحرارة في داخل أنبوب المستقبل $h_{c,i} = 320\,W/m^2.K$؛
6. الموصلية الحرارية للأنبوب الفولاذي $k = 15\,W/m.K$؛
7. درجة حرارة الهواء الجوي والسماء $T_a = 20^\circ C = 293\ K$؛
8. سرعة الرياح فوق الغطاء الزجاجي $V = 5\ m/s$.

الحل:

(أ) مساحة المستقبل (الأنبوبة الماصة) هي:

$$A_r = \pi D_o L = \pi \times 0.05 \times 10 = 1.57\ m^2$$

مساحة فتحة المنفذ المعرضة للشمس (الغير مظللة):

$$A_a = (2.4 - 0.8) \times 10 = 23.2\ m^2$$

لإيجاد انتقال الحرارة بالحمل والإشعاع في الغطاء الزجاجي، فسيكون من الضروري أولاً، فرض درجة حرارتها بواسطة (التجربة والخطأ). بفرض درجة حرارة الغطاء الزجاجي $T_c = 65^\circ C = 338\ K$.

معامل انتقال الحرارة بالرياح (الحمل)، $h_w = h_{cca}$، يمكن حسابه للغطاء الزجاجي باستخدام المعادلة التالية:

$$Nu = \frac{h_w D_c}{k_a} = 0.25 \mathrm{Re}^{0.6} \mathrm{Pr}^{0.38}$$

حيث توجد جميع الخواص عند درجة حرارة الشريط والتي تساوي: $\frac{1}{2}(20 + 65) = 42.5^\circ C$. وبهذا فإن الخواص الحرارية للهواء عند درجة حرارة $42.5^\circ C$ هي:

$\rho = 1.12\ kg/m^3$، $\mu = 2.01 \times 10^{-5}\ kg/m.s$، $k_a = 0.0274\ W/m.K$، $\mathrm{Pr} = 0.704$.

إذن:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V D_c}{\mu} = \frac{1.12 \times 5 \times 0.08}{2.01 \times 10^{-5}} = 22{,}300$$

وبالتالي فإن رقم ناسلت هو:

$$Nu = 0.25 (22{,}300)^{0.6} (0.704)^{0.38} = 88.9$$

وبهذا فإن معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الغطاء الزجاجي والهواء هو:

$$h_w = h_{cca} = \frac{Nu\, k_a}{D_c} = \frac{88.9 \times 0.0274}{0.08} = 30.4\, W/m^2.K$$

أما معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الغطاء الزجاجي والسماء h_{rca}، فيُحسب من المعادلة التالية:

$$h_{rca} = \varepsilon_c\, \sigma (T_c + T_a)(T_c^2 + T_a^2)$$

$$h_{rca} = 0.88(5.67 \times 10^{-8})(338 + 293)(338^2 + 293^2) = 6.30\, W/m^2.K$$

ومعامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين أنبوب المستقبل والغطاء الزجاجي h_{rrc}، يُحسب من المعادلة التالية:

$$h_{rrc} = \frac{\sigma (T_c + T_a)(T_c^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{A_r}{A_c}\left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1\right)}$$

$$h_{rrc} = \frac{(5.67 \times 10^{-8})(513 + 338)(513^2 + 338^2)}{\frac{1}{0.90} + \frac{0.05}{0.08}\left(\frac{1}{0.88} - 1\right)} = 15.20\, W/m^2.K$$

وحيث أن المسافة بين المستقبل والغطاء الزجاجي مفرغة، فإنه لا يوجد انتقال حراري بالحمل بينهما. وبالتالي فإن معامل الفقد الحراري الكلي U_c على أساس مساحة المستقبل، تُعطى بالمعادلة (9.4) كالتالي:

$$U_c = \left[\frac{A_r}{A_c\,(h_{cca} + h_{rca})} + \frac{1}{h_{rrc}}\right]^{-1}$$

$$=\left[\frac{0.05}{0.08(30.4+6.3)}+\frac{1}{15.2}\right]^{-1}=12.1\,W/m^2.K$$

قيمة U_c كانت على أساس درجة حرارة الغطاء الزجاجي المفروضة $65^\circ C$. ولاختبار صحة الفرضية، يجب التأكد من أن معدل انتقال الحرارة من المستقبل إلى الغطاء الزجاجي يساوي معدل انتقال الحرارة من الغطاء الزجاجي إلى الهواء الجوي، فإنه:

$$A_r\,h_{rrc}\,(T_r-T_c)=A_a\,(h_{cca}+h_{rca})(T_c-T_a)$$

وبهذا، فإنه يمكن صياغة درجة حرارة الغطاء الزجاجي على الصورة التالية:

$$T_c=\frac{h_{rrc}\,T_r+(A_c/A_r)(h_{cca}+h_{rca})T_a}{h_{rrc}+(A_c/A_r)(h_{cca}+h_{rca})}$$

$$T_c=\frac{15.2\times 240+(0.08/0.05)(30.4+6.3)\times 20}{15.2+(0.08/0.05)(30.4+6.3)}=65^\circ C$$

وهي مطابقة لتلك المفروضة. وبذلك فإن درجة حرارة الغطاء الزجاجي T_c المفروضة في المحاولة الأولى صحيحة، وبالتالي فإن معامل الفقد الحراري الكلي المحسوب سابقاً صحيح أي أن:

◁ $U_c=12.1\,W/K.m^2$ على وحدة مساحة المستقبل

(ب) معامل كفاءة المجمع الشمسي تُعين من المعادلة (14.4):

$$F'=\frac{\dfrac{1}{U_c}}{\dfrac{1}{U_c}+\dfrac{D_o}{h_{ci}\,D_i}+\dfrac{D_o\ln(D_o/D_i)}{2k}}$$

$$= \frac{1/12.1}{\frac{1}{12.21} + \frac{0.05}{320 \times 0.04} + \frac{0.05 \times \ln(0.05/0.04)}{2 \times 15}} = 0.95$$

ويُحسب معامل الإزاحة الحرارية من المعادلة (11.4):

$$F_R = \frac{\dot{m} c_p}{A_r U_c}\left[1 - \exp\left(-\frac{A_r U_c F'}{\dot{m} c_p}\right)\right]$$

$$= \frac{0.1 \times 1340}{1.57 \times 12.1}\left[1 - \exp\left(-\frac{1.57 \times 12.1 \times 0.95}{0.1 \times 1340}\right)\right] = 0.89$$

وبالتالي فإن الطاقة المفيدة المكتسبة يمكن تحديدها من المعادلة (8.4) كالتالي:

$$q_u = A_a F_R\left[H_a - \frac{A_r}{A_a} U_c \left(T_{fi} - T_a\right)\right]$$

$$= 23.2 \times 0.89\left[400 - \frac{1.57}{23.2} \times 12.1 \times (200 - 20)\right] = 5220\, W$$ ◁

ودرجة حرارة خروج المائع من المجمع T_{fout}، يمكن الحصول عليها من معادلة اتزان الطاقة كالتالي:

$$q_u = \dot{m}\, c_p \left(T_{fout} - T_{fin}\right)$$

$$T_{fout} = T_{fin} + \frac{q_u}{\dot{m} c_p} = 200 + \frac{5220}{0.1 \times 1340} = 239^\circ C$$

6.4 أداء مركزات القطع المكافئ المركب (CPC)

الكفاءة اللحظية للمجمعات المركزة نوع القطع المكافئ، تُعرف بأنها نسبة الطاقة المفيدة المكتسبة إلى الطاقة الشمسية الساقطة على مساحة فتحة المنفذ، أو:

$$\eta_c = \frac{q_u}{A_a H_t} \qquad (20.4)$$

حيث: H_t = الطاقة الشمسية الكلية (المباشرة والمنتشرة) الساقطة على وحدة مساحة فتحة المنفذ

A_a = مساحة فتحة المنفذ

H_a = الطاقة الشمسية الممتصة من قبل المستقبل، والتي تساوي:

$$H_a = \left(H_{B,cpc}\, \tau_{c,B}\, \alpha_B + H_{d,cpc}\, \tau_{c,d}\, \alpha_d\right)\tau_{cpc}$$

حيث: $H_{B,cpc}$، $H_{d,cpc}$، الأشعة المباشرة والمنتشرة، الساقطة على فتحة المنفذ بزاوية الاستقبال للمجمع CPC، $\alpha_B\, \tau_{cB}$، $\alpha_d\, \tau_{cd}$، حاصل ضرب نفاذية الغطاء الزجاجي للمجمع وامتصاصية المستقبل للأشعة المباشرة والمنتشرة، على التوالي. τ_{cpc}، هي نفاذية CPC بالأخذ بالحسبان الفاقد بالانعكاس.

ولقد بين رابل وآخرون (Rabl, et al., 1980) أن التشميس H_{cpc} بزاوية الاستقبال CPC لتركيز C، يمكن تمثيلها بدقة على الصورة التالية:

$$\begin{aligned} H_{cpc} &= H_B + \frac{1}{C} H_d = (H_t - H_d) + \frac{1}{C} H_d \\ &= H_t - \left(1 - \frac{1}{C}\right) H_d \end{aligned} \qquad (21.4)$$

حيث: H_B، H_d، H_t، الإشعاع المباشر، المنتشر، والكلي، على التوالي، على مستوى فتحة المنفذ. من الملائم صياغة الأشعة الممتصة H_a بدلالة H_{cpc} على الصورة التالية:

$$H_a = H_{cpc}\, \tau_{cover}\, \tau_{cpc}\, \alpha_r$$

$$= \left[H_t - \left(1 - \frac{1}{C}\right) H_d\right] \tau_{cover}\, \tau_{cpc}\, \alpha_r$$

$$= H_t \, \tau_{cover} \, \tau_{cpc} \, \alpha_r \left[1 - \left(1 - \frac{1}{C} \right) \frac{H_d}{H_t} \right]$$

أو:

$$H_a = H_t \, \tau_{cover} \, \tau_{cpc} \, \alpha_r \, \gamma \qquad (22.4)$$

حيث: τ_{cover} = نفاذية الغطاء الزجاجي

τ_{cpc} = النفاذية الفعالة للمجمع CPC

α_r = امتصاصية المستقبل

γ معامل التصحيح للأشعة المنتشرة

$$\gamma = 1 - \left(1 - \frac{1}{C} \right) \frac{H_d}{H_t} \qquad (23.4)$$

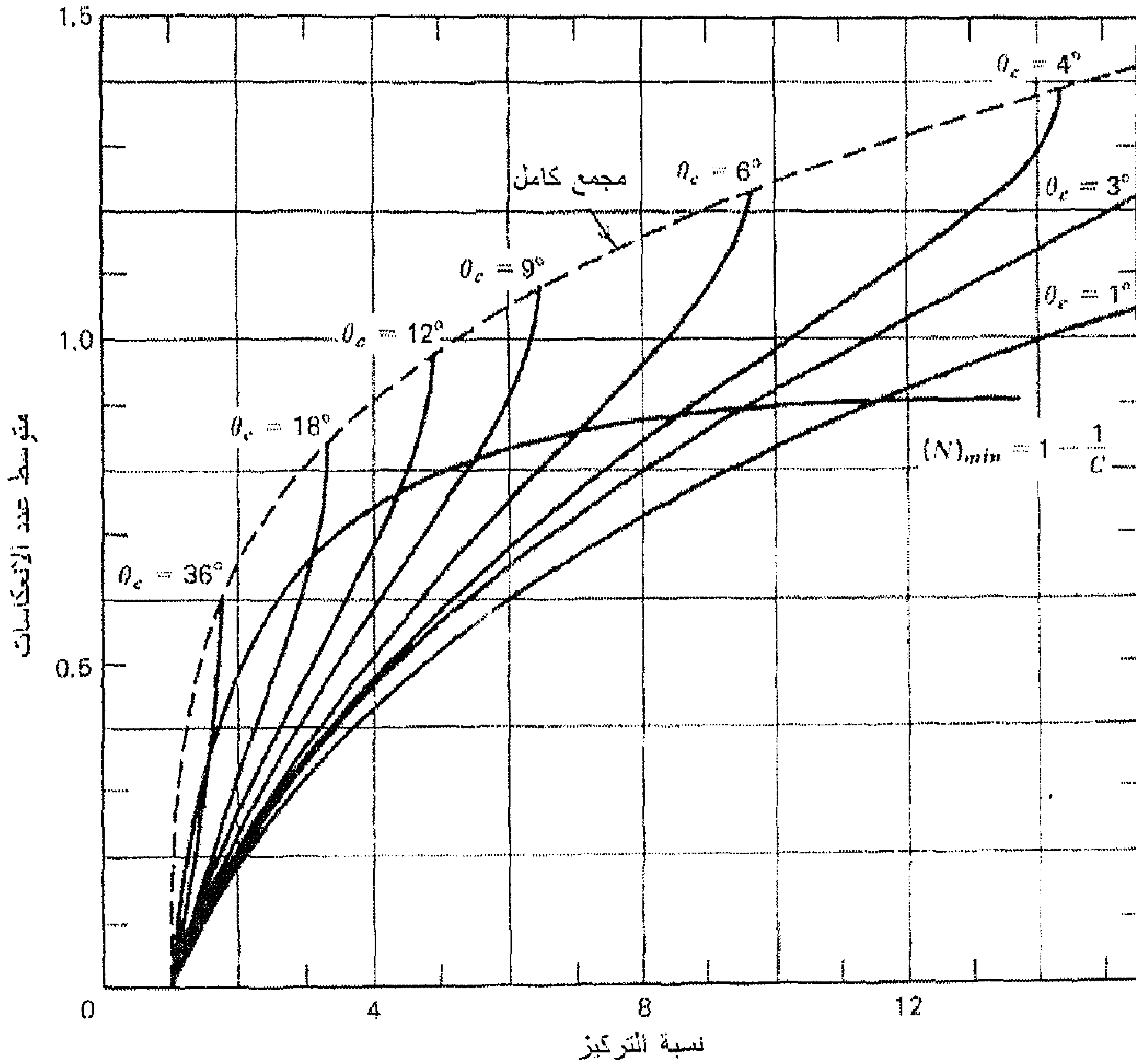
معامل التصحيح γ في المعادلة (23.4) يأخذ في الحسبان الفقد في الأشعة المنتشرة والتي تكون خارج زاوية الاستقبال للمجمع CPC بمساحة تركيز C. لاحظ أن القيمة العددية لنسبة الإشعاع المنتشر (H_d/H_t) تتراوح من 0.11~ في الأيام المشرقة الصافية تماماً إلى 0.23 ~ للأيام الغائمة كلياً.

النفاذية الفعالة للمجمع CPC، τ_{cpc}، تأخذ بالحسبان خسائر الانعكاس داخل المجمع CPC. جزء من الأشعة المارة خلال فتحة المنفذ والذي في أخر المطاف يصل إلى المستقبل، يعتمد على انعكاسية جدار المجمع CPC، ρ_{cpc}، وعلى متوسط عدد الانعكاسات، n_r. النفاذية الفعالة للمجمع CPC يمكن صياغتها على الصورة التقريبية التالية:

$$\tau_{cpc} = (\rho_{cpc})^{n_r} \qquad (24.4)$$

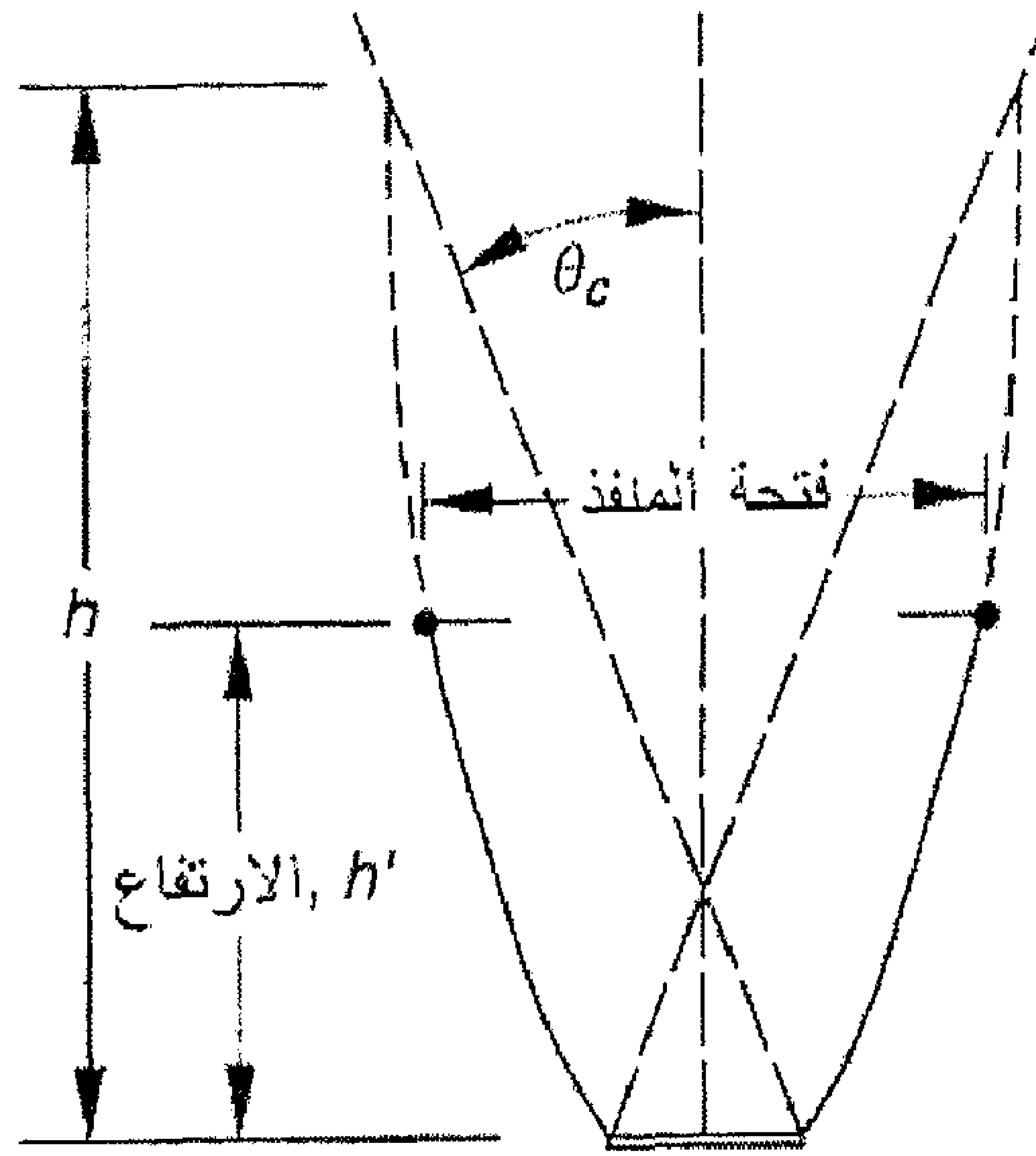
قيم n_r لمجمعات CPC الكاملة والمبتورة يمكن الحصول عليها من الشكل (8.4).

في الواقع، تُساعد النهايات العليا لمجمعات CPC، الأشعة الشمسية في الوصـول إلى المستقبل، إلا أنه في مجمعات CPC غالباً ما تُبتر من الأعلـى في التطبيقـات العمليـة لأسباب اقتصادية. وكان لزاماً علينا ذكر أثر هذا البتر.



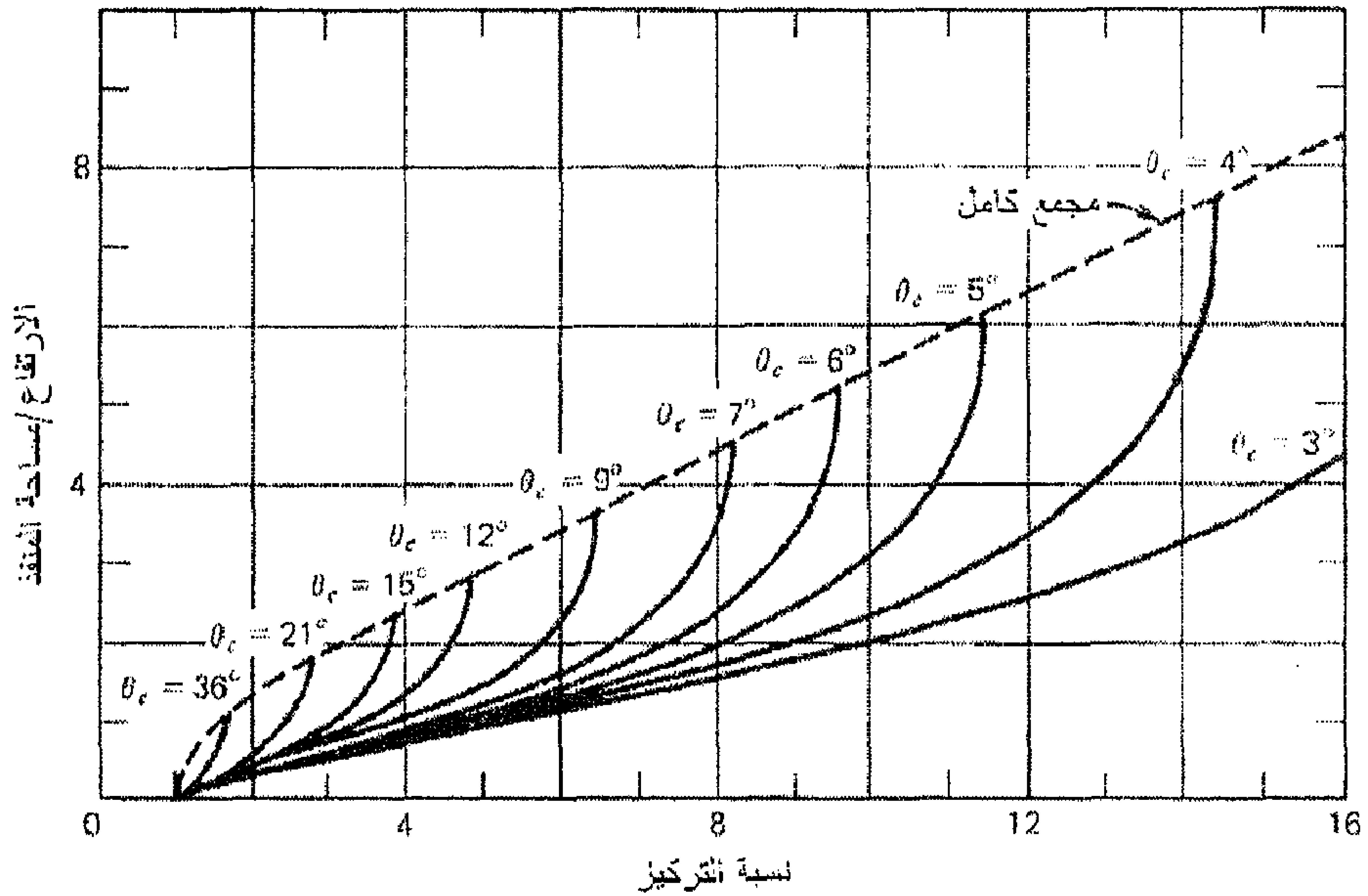
شكل (8.4) متوسط عدد الانعكاسات لمجمعات التركيز CPC الكاملة والمبتورة، (Rabl, 1976)

الشكل (9.4) يصف مجمـع CPC بمسـتقبل مسـتوي مبتـور حـوالي نصـف طولـه الكلي. كما هو مبين بالشكل، فان البتر لا يؤثر على زاوية الاسـتقبال، ومـع ذلـك فانه يتسع للإشعاع من خارج زاوية الاستقبال. تأثير البتر مبين في الأشكال الثلاثـة التالية، (Rabl, 1976):



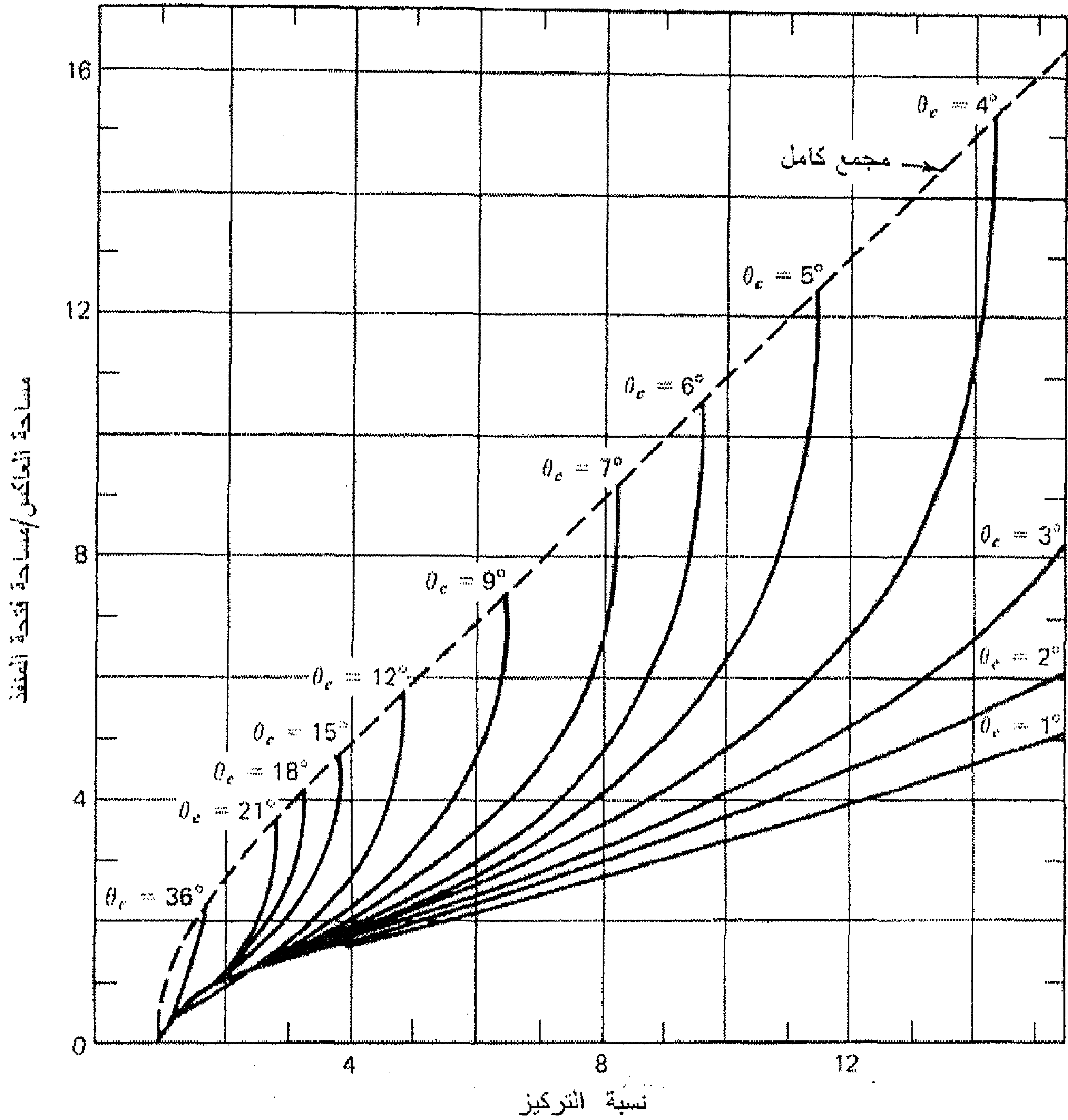
شكل (9.4) رسم لمجمع تركيز CPC بتر حوالي نصف طوله

الشكل (10.4) يمثل نسبة ارتفاع إلى مسافة فتحة المنفذ لكل من المجمع الكامل والمبتور، كدالة في C, θ_a.



شكل (10.4) نسبة الارتفاع إلى مساحة المنفذ لمجمعات التركيز CPC الكاملة والمبتورة

الشكل (11.4) يمثل نسبة مساحة العاكس إلى مساحة فتحة المنفذ لكل من المجمع الكامل والمبتور، كدالة في C, θ_a.



شكل (11.4) نسبة مساحة العاكس إلى مساحة فتحة المنفذ لمجمعات التركيز CPC الكاملة والمبتورة

طريقة التعامل مع هذه الأشكال موضحة في المثال (2.4).

الشكل الهندسي لمجمعات CPC عامة معقد للغاية، وتعيين معامل الفقد الحراري رياضياً سيكون عملية طويلة. مجموعة من معادلات اتزان الطاقة الغير خطية يجب حلها آنياً لإيجاد درجات حرارة السطوح المختلفة. درجات الحرارة تلك، ضرورية لتقييم الفقد الحراري على أساس تركيب المجمع CPC نتيجة لأنماط انتقال الحرارة المختلفة. منذ أن كانت لمجمعات CPC تراكيب مختلفة وعديدة، فانه يجب إجراء التحاليل نوعياً.

المجمع CPC المبين في الشكل (12.4)، مصمم ومتوفر تجارياً. في هذا التصميم، المستقبل والغلاف يكونا عل شكل اسطوانتين متحدتي المحور، والمسافة الفاصلة بينهما مفرغة. السطح الخارجي للمستقبل مطلي بمادة انتقائية. المائع يدور خلال أنبوب على شكل حرف U داخل المستقبل. هناك فجوة بين غطاء المستقبل ونتوء المجمع CPC. مدخل المجمع العلوي مغطى بغطاء شفاف. مثل هذا المجمع، تم تحليله بالتفصيل ولقد أُقترحت معادلات تجريبية لتعيين معامل الفقد من قبل هسيه و مي (Hsieh, Mei, 1983)، (Hsieh, 1981). ستُقدم هذه المعادلات التجريبية هنا كما هي، وللمزيد من المعلومات وجب الإطلاع على الورقة الأصلية.

شكل (12.4) رسم تخطيطي لمجمع تركيز CPC تجاري

لدرجات حرارة: $29^\circ C \le (T_r - T_a) \le \left(137 + 0.0283T_a - 0.0000616T_a^2\right)$

$$U_c = (0.18 + 16.95\varepsilon_r)[0.212 + 0.00255T_a + (0.00186 + 0.000012T_a)(T_r - T_a)] \quad (\text{أ } 25.4)$$

ولدرجات حرارة: $\left(137 + 0.0283T_a - 0.0000616T_a^2\right) \le (T_r - T_a) \le 260^\circ C$

$$U_c = (0.168 + 17.16\varepsilon_r)[0.086 + 0.00255T_a + (0.00278 + 0.000014T_a)(T_r - T_a)] \quad (\text{ب } 25.4)$$

حيث: U_c = معامل الفقد الحراري الكلي للمجمع على وحدة مساحة المستقبل، $W/K.m^2$.

T_r = درجة حرارة المستقبل، $^\circ C$.

T_a = درجة حرارة الوسط المحيط، $^\circ C$.

ε_r = انبعاثية سطح المستقبل.

هذه المعادلات التجريبية صالحة تحت الشروط التالية: انبعاثية سطح المستقبل، $\varepsilon_r = 0.05 - 0.2$، سرعة رياح، $V = 0 - 10$ m/s، نسبة تركيز، $C = 1.5 - 6$، تبعاً لذلك، فان متوسط عدد الانعكاسات سيكون، $n_r = 0.55 - 1.05$، درجة حرارة المحيط، $T_a = -10 - 35^\circ C$، شدة الإشعاع الكلي على مساحة فتحة المنفذ، $H_t = 720 - 1200\ W/m^2$، ونسبة الأشعة المنتشرة إلى المباشرة، $H_d / H_B = 0.1 - 0.5$.

مثال 2.4

(أ) مجمع تركيز CPC كامل بمستقبل مستوي نصف زاوية الاستقبال له θ_c تساوي 9°. ما هي نسبة تركيزه، نسبة ارتفاعه إلى مساحة فتحة منفذه، ونسبة مساحة عاكسه إلى مساحة فتحة منفذه؟ جد أيضاً متوسط عدد انعكاسات الشعاع قبل وصوله إلى السطح الماص.

(ب) فإذا تم بتر هذا المجمع عند نسبة طول إلى مساحة فتحة منفذ تساوي 1.5، كم ستصبح نسبة تركيزه، نسبة مساحة عاكسه إلى مساحة فتحة منفذه، ومتوسط عدد الانعكاسات؟

الحل:

(أ) مجمع تركيز CPC كامل $\theta_c = 9°$.

من الشكل (10.4)، فإن نسبة التركيز= 6.4 ، نسبة الارتفاع/ مساحة فتحة المنفذ = 3.6.

من الشكل (11.4)، نجد أن نسبة مساحة العاكس/ مساحة فتحة المنفذ = 7.4.

من الشكل (8.4)، نجد أن عدد الانعكاسات: $0.8 = 1-1/5 = 1-(1/C)$.

(ب) مجمع تركيز CPC مبتور $\theta_c = 9°$، نسبة الارتفاع/ مساحة فتحة المنفذ = 1.5.

من الشكل (10.4)، فإن نسبة التركيز= 5.0.

من الشكل (11.4)، نجد أن نسبة مساحة العاكس/ مساحة فتحة المنفذ = 3.1.

من الشكل (8.4)، نجد أن عدد الانعكاسات: $0.8 = 1-1/5 = 1-(1/C)$.

مثال 3.4

مجمع تركيز CPC على صورة ذلك المبين في الشكل (12.4)، مساحة فتحة منفذه A_a تساوي $2.5\,m^2$ ومساحة غلاف المستقبل (الماص) A_r تساوي $1.5\,m^2$. جد كفاءة المجمع تحت الظروف التالية:

1. الأشعة الشمسية الكلية $H_t = 800\,W/m^2$ على وحدة مساحة فتحة المنفذ؛
2. نسبة الأشعة المنتشرة إلى الأشعة الكلية تساوي 0.11؛
3. السطح الماص انتقائي بامتصاصية $\alpha_r = 0.85$ وبانبعاثية $\varepsilon_r = 0.10$؛
4. انعكاسية المرايا العاكسة $\rho = 0.90$ ؛

5. نفاذية الغطاء الزجاجي $\tau_{cover} = 0.90$؛
6. درجة دخول المائع العامل إلى المستقبل الأنبوبي $T_{fin} = 100°C$، بمعدل تدفق $\dot{m} = 0.05\ kg/s$، وحرارته النوعية $c_p = 3220\ J/kg.K$؛
7. درجة حرارة الهواء الجوي $T_a = 20°C$؛
8. معامل كفاءة المجمع $F' = 0.90$.

الحل:

نسبة التركيز للمجمع C:

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{2.5}{1.5} = 1.67$$

معامل التصحيح للأشعة المنتشرة γ تُحسب من المعادلة (23.4)

$$\gamma = 1 - \left(1 - \frac{1}{C}\right)\frac{H_d}{H_t} = 1 - \left(1 - \frac{1}{1.67}\right)0.11 = 0.96$$

بفرض أن الشكل (8.4) يمكن استخدامه لنوع مجمعات التركيز المطلوب تحليله في هذا المثال، وبالتالي لمجمع CPC كامل وبنسبة تركيز $C = 1.67$، فإن متوسط عدد الانعكاسات $n_r = 0.60$. من المعادلة (24.4)، نحصل على:

$$\tau_{cpc} = (\rho_{cpc})^{n_r} = 0.90^{0.60} = 0.94$$

تُعطى الأشعة الممتصة H_a بالمعادلة (22.4)

$$H_a = H_t\,\tau_{cover}\,\tau_{cpc}\,\alpha_r\,\gamma$$

$$= 800 \times 0.90 \times 0.94 \times 0.85 \times 0.96 = 550\ W/m^2$$

ولحساب معامل الفقد الحراري الكلي للمجمع بواسطة المعادلة (25.4)، فيجب أولاً إيجاد المعامل:

$\left(137+0.0283T_a-0.0000616T_a^2\right)$. عند درجة حرارة الهواء الجوي $T_a=20^\circ C$، فإن قيمة المعامل هي 137.5. وقبل البدء في إجراء إي عملية حسابية أخرى، لابد من معرفة درجة حرارة سطح الماص T_r. وذلك بفرض أنها تساوي $T_r=175^\circ C$ في عملية (التجربة والخطأ). وبما أن $T_r-T_a=175-20=155^\circ C$ أكبر من $137.5^\circ C$، وبالتالي فإنه يمكن تطبيق المعادلة (25.4ب). إذن:

$$U_c=(0.168+17.16\times0.1)[0.086+0.00225\times20$$

$$+(0.00278+0.000014\times20)(175-20)]=1.1\,W/m^2.K$$

ويمكن الآن حساب معامل الإزاحة الحرارية F_R من المعادلة (11.4):

$$F_R=\frac{\dot{m}c_p}{A_rU_c}\left[1-\exp\left(-\frac{A_rU_cF'}{\dot{m}c_p}\right)\right]$$

$$=\frac{0.05\times3220}{1.5\times1.1}\left[1-\exp\left(-\frac{1.5\times1.1\times0.90}{0.05\times3220}\right)\right]=0.90$$

وبالتالي فإن الطاقة المفيدة المكتسبة تُحسب من المعادلة (8.4):

$$q_u=A_aF_R\left[H_a-\frac{A_r}{A_a}U_c\left(T_{fi}-T_a\right)\right]$$

$$=2.5\times0.90\left[550-\frac{1.5}{2.5}\times1.1\times(100-20)\right]=1120\,W$$

وللتأكد من صحة فرضية قيمة T_r، فسيتم استخدام المعادلة التالية لحساب قيمة T_r كالتالي:

$$T_r = T_{fin} + \frac{q_u / A_a}{\frac{A_r}{A_a} U_c F_R}(1 - F_R)$$

$$= 100 + \frac{1120}{1.5 \times 1.1 \times 0.90}(1 - 0.90) = 175^\circ C$$

وهـي مسـاوية لتلـك المفروضـة في أول محاولـة. وبالتـالي فـإن: $T_r = 175^\circ C$ ، $q_u = 1120\,W$.

وبالتالي فإن كفاءة المجمع هي:

$$\eta_c = \frac{q_u}{A_a H_t} = \frac{1120}{2.5 \times 800} = 56\%$$ ◁

كما يمكن التنبؤ بدرجة خروج المائع من المجمع T_{fout}، وذلك من الموازنة الحرارية التالية:

$$q_u = \dot{m} c_p (T_{fout} - T_{fin})$$

أو:

$$T_{fout} = T_{fin} + \frac{q_u}{\dot{m} c_p} = 100 + \frac{1120}{0.05 \times 3220} = 107^\circ C$$

وحيث أن درجة حرارة خروج المائع T_{fout} أصغر بكثير من درجة حـرارة السـطح الماص T_r، فإنه يجب أن توصل هذه المجمعات على التوالي للحصول علـى درجـة حرارة عالية في النهاية.

المراجع

1. Duffie, J. A., Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Suns inc., 2nd edition, 1991.
2. Elsayed, M.M, Taha, I.S., Sabbagh, J.A., *Design of Solar Thermal Systems*, Scientific Publishing Center, King Abdulaziz University, Jeddah- Saudi Arabia Kingdom, (1984).
3. Hsieh, C.K., Mei, F.M., *Solar Energy*, **30**, 487 (1983). "Empirical Equations for Calculation of CPC Collector Loss Coefficients."
4. Hsieh, C.K., *Solar Energy*, **27**, 19 (1966). "Thermal Analysis of CPC Collectors."
5. Hsieh, S. J., *Solar Energy Engineering*, Prentic-Hall, (1981).
6. Kreith, F., Kreider, J.F., *Principles of Solar Engineering*, Hemisphere Publishing Corporation, USA, (1978).
7. Rabl, A., O'Gallagher, J., Winston, R., *Solar Energy*, **25**, 335 (1980). "Design and Test-Evacuated Solar Collectors with Compound Parabolic Concentrators."
8. Rabl, A., *Solar Energy*, **18**, 497 (1976). "Optical Properties of Compound Parabolic Concentrators."
9. Rabl, A., *Solar Energy*, **18**, 93 (1975). "Comparison of Solar Concentrators."
10. Tabor, H., *Solar Energy*, **10**, 111 (1966). "Radiation, Convection and Conduction Coefficients in Solar Collectors."
11. Winston, R., Hinterberger, H., *Solar Energy*, **17**, 255 (1975). "Principles of Cylindrical Concentrators for Solar Energy."

الفصل الخامس
تخزين الطاقة الشمسية

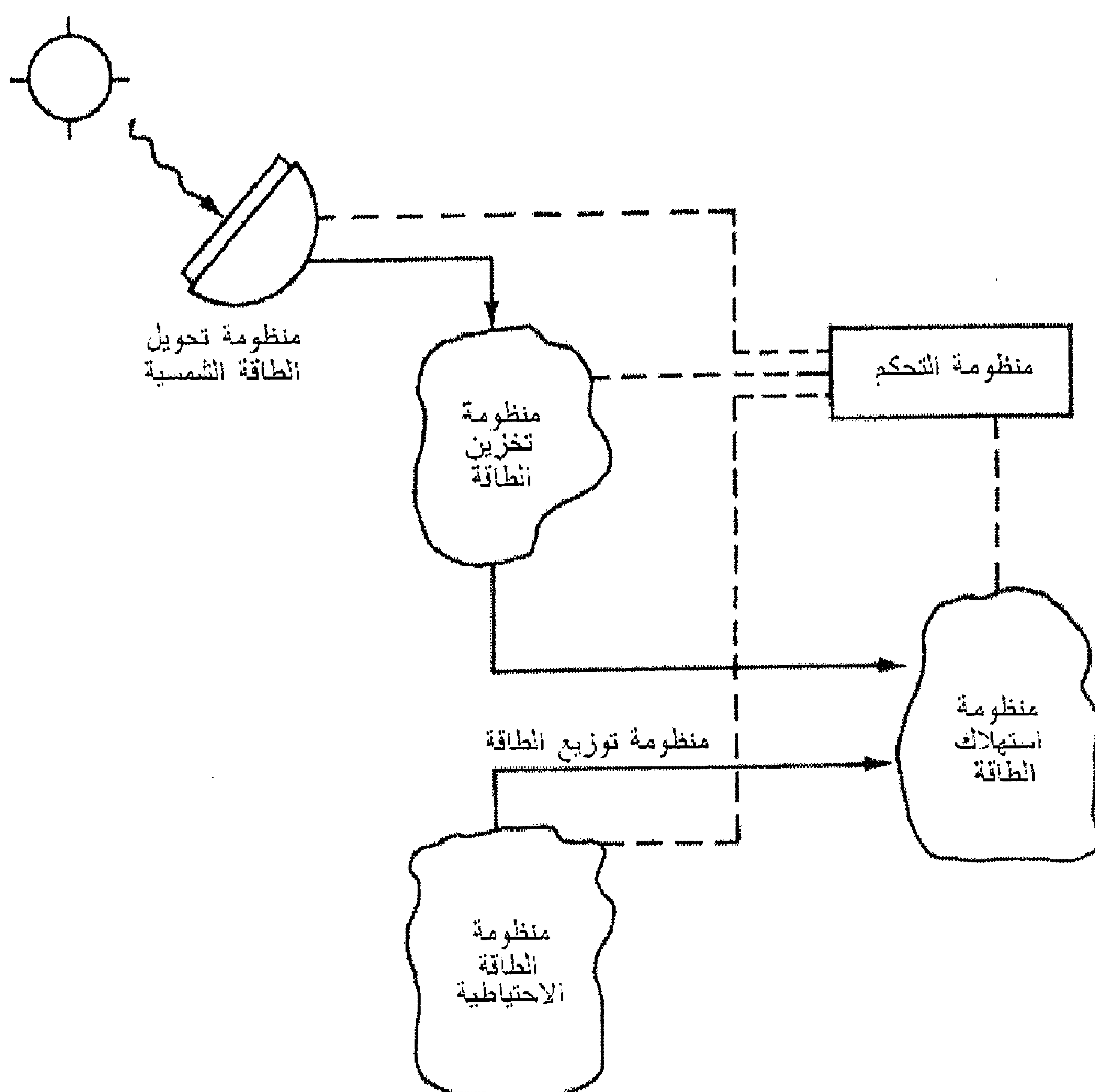
1.5 مقدمة

من أكبر الصعوبات التي تواجه استخدامات الطاقة الشمسية هي كونها مصدر غير منتظم من حيث المقدار والاستمرارية، بحيث يوجد فائض منها في فترات زمنية معينة (نهاراً، صيفاً) ونقص في فترات أخرى (ليلاً، شتاءاً)، مما يسبب في قلة اعتماديتها كمصدر للطاقة. فالحاجة إلى الطاقة للعديد من التطبيقات تتراوح مع الزمن من أقصى إلى أدنى مستوياتها، وكذلك الحال بالنسبة للطاقة الشمسية. لكنه لا يوجد أية ضمانات للتقابل الزمني بين العرض (الطاقة الشمسية) والطلب (الحمل). على سبيل المثال نحتاج إلى الماء الساخن ليلاً، ولا وجود للطاقة الشمسية ليلاً. كما إننا بحاجة إلى كمية كبيرة من الطاقة الحرارية لتدفئة منازلنا شتاءاً، في الوقت الذي لا تتوفر الطاقة الشمسية بتلك الكمية شتاءاً، كما أنه ليس من الملائم تصميم منظومة تدفئة كبيرة الحجم لتغطية الحمل الشتوي بالكامل فقط !

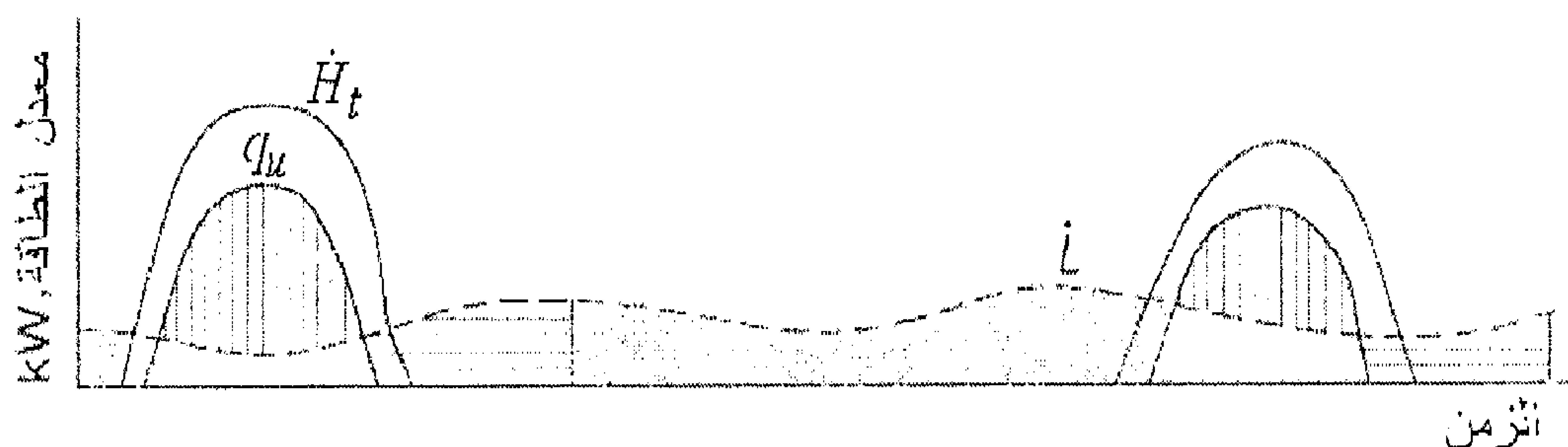
تكتسب تقنية التخزين أهمية كبيرة في تحسين كفاءة أداء واعتمادية منظومات الطاقة الشمسية، وتعتبر المفتاح الرئيسي لاستغلال الطاقة الشمسي بصورة واسعة وعلى نطاق تجاري. إن معظم المنظومات الشمسية الحرارية منها أو الكهربائية تستخدم شكل أو أكثر من أشكال نظم تخزين الطاقة الشمسية. الشكل (1.5) يبين مخطط لمنظومة شمسية، والتي تتضمن العناصر الأساسية التالية (Elsayed, et al, 1984):

1. منظومة تحويل الطاقة الشمسية (مجمع شمسي في حالة التحويل الحراري، الخلايا الفوتوضوئية للتحول الكهربائي).
2. منظومة تخزين الطاقة الشمسية في صورتها الأخيرة.
3. منظومة التحكم.
4. منظومة الطاقة الاحتياطية.
5. منظومة استهلاك الطاقة.
6. منظومة توزيع الطاقة.

إن أهمية هذا الموضوع، تكمن في ضرورة تخزين الطاقة الشمسية في خزانات لاستخدامها حين الطلب عند عدم وجود أو عجز العرض، وذلك لتلبية متطلبات الحمل. الشكل (2.5) يوضح سلوك المنظومة الشمسية، حيث تشير المساحة البيضاء تحت خط الحمل إلى الطاقة التي تغطيها الطاقة الشمسية مباشرة من منظومة التحويل وبدون تخزين. بينما تشير المساحة المهشرة طولياً إلى الفائض من الطاقة الشمسية المفيدة q_u المكتسبة من تحويل الأشعة الشمسية الكلية H_t الساقطة على سطح منظومة التحويل، أما الحمل $\dot{L}$ فيحدده الخط المتقطع. في معظم التطبيقات وليس من الاقتصادي تغطية كل الحمل عن طريق الطاقة الشمسية لفترة زمنية طويلة. فالطاقة الشمسية الفائضة $(q_u - \dot{L})$ يمكن تخزينها كمساحة مهشرة أفقياً لتعويض النقص من الطاقة الشمسية عندما تكون $(q_u < \dot{L})$ وعند العجز الكلي أو الجزئي عن تغطية الطلب فستقوم منظومة الطاقة الاحتياطية بتغطية العجز والذي يتمثل في الشكل بالمساحة المعتمة.



شكل (1.5) مكونات منظومة شمسية، حيث تشير الخطوط المتواصلة إلى أنابيب سريان المائع العامل، بينما تشير الخطوط المتقطعة إلى أسلاك التوصيل الكهربائية



شكل (2.5) سلوك منظومة شمسية ومنظومة الطلب مع الزمن كمعدل للطاقات، المتوفرة، المخزونة، المطلوبة وحجم الطاقة الاحتياطية

2.5 أساليب تخزين الطاقة الشمسية

يمكن تخزين الطاقة الشمسية على أي شكل من أشكال الطاقة: الحرارية، الكيميائية، الميكانيكية، الكهربائية. الخزن الحراري يتمثل عن طريق نقل الطاقة المفيدة المكتسبة من المجمعات الشمسية إلى وسط التخزين، حيث تقوم بزيادة الطاقة الداخلية للوسط. قد يحدث هذا بتغير في الطور أو بدونه.

الخزن الكيمائي يمكن أن يصنف إلى خزن كيمياحراري أو كيمياكهربائي. في الخزن الكيمياحراري فان الطاقة المفيدة المكتسبة في المجمع الشمسي تُضاف إلى مركبات كيمائية مناسبة ليحدث تفاعل كيمياحراري ينتج عنه مواد كيمائية يمكن تخزينها، كإنتاج غاز الهيدروجين، هذا الوقود يمكن بعد ذلك أن يستخدم عند الحاجة. الهيدروجين يمكن أن يتولد أيضاً من العمليات الكيمياكهربائية. يحدث هذا بواسطة تحويل الطاقة المفيدة إلى طاقة كهربائية حيث يمكن عن طريق ديلزة الماء أو حمض الكبريتيك الحصول على غاز الهيدروجين.

والتخزين بواسطة الطرق الميكانيكية يمكن إنجازه على المدى القصير، وذلك بتحويل الطاقة الحرارية من المجمع الشمسي إلى طاقة ميكانيكية تدور عمود دوران، هذه الطاقة يمكن تخزينها على صورة طاقة داخلية (على سبيل المثال، هواء مضغوط)، أو على صورة طاقة وضعية (على سبيل المثال، ضخ ماء من مستوى منخفض إلى مستوى أعلى) أو على صورة طاقة حركية والتي يمكن تخزينها في حذافة. كل هذه الصور يمكن إعادتها ثانية إلى طاقة ميكانيكية والتي يمكن استخدامها مباشرة لتوليد الطاقة الكهربائية.

أما الطاقة الكهربائية فيمكن أن تخزن في بطاريات. وتعتبر الخلايا الكهروضوئية من أهم التطبيقات الشمسية التي تستخدم مثل هذه الطرق لتخزين الطاقة الشمسية.

ويعتمد اختيار طريقة التخزين على طبيعة العملية. فمثلا لعملية تسخين المياه، فان خزن الطاقة كحرارة محسوسة في الماء المخزن تكون عملية منطقية. فإذا كانت مجمعات تسخين الهواء هي المستعملة، فإنه يمكن استخدام طرق تخزين الحرارة على صورتها المحسوسة أو الكامنة. وفي التسخين الغير فعال (السلبي)، يكون التخزين على صورة حرارة محسوسة مباشرة في جسم عناصر المبني. أما إذا كانت العملية فوتوفولتية أو فوتوكيمائية، فان التخزين المنطقي يكون على شكل طاقة كيميائية.

إن الخصائص الأساسية لأنظمة خزن الطاقة الحرارية هي: (1) السعة على وحدة حجم الخزان، (2) مدى درجة حرارة التشغيل، وهي درجة الحرارة التي عندها تضاف أو تسحب الحرارة إلى أو من الخزان، (3) فرق درجات حرارة الإضافة والسحب المرافقة لظروف التشغيل، (4) تدرج درجات الحرارة في الخزان، (5) الطاقة اللازمة لإضافة أو سحب الحرارة إلى ومن الخزان، (6) طرق التحكم في الفقد الحراري من الخزان، (7) التكلفة.

ويتضمن هذا الفصل شرحاً مفصلاً لبعض أنواع التخزين، وموجزاً للبعض الأخر وذلك حسب الأهمية العملية لكل منها.

3.5 وسائط التخزين السائلة

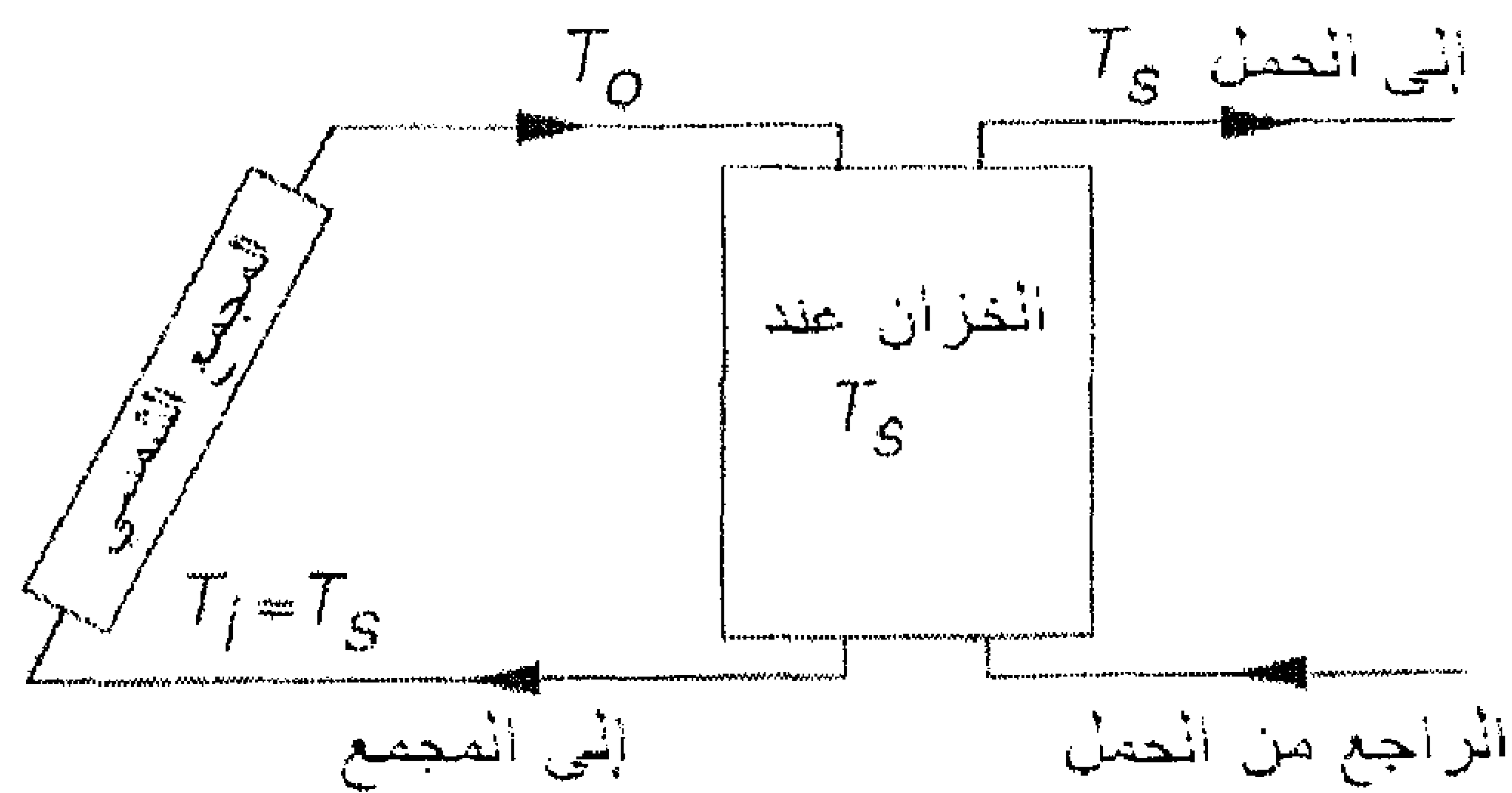
يعتبر الماء من المواد الشائعة الاستخدام في تخزين الحرارة المحسوسة. وهناك سوائل أخرى تُستخدم على نطاق ضيق لهذا الغرض، ويبين الجدول (1.5) أهم السوائل المستخدمة ومواصفاتها.

جدول (1.5) الوسائط السائلة لتخزين الحرارة المحسوسة

وسط التخزين	درجة الحرارة $^{\circ}C$ الذوبان	درجة الحرارة $^{\circ}C$ التبخر	كلفة المادة* $\$/kg$	الكثافة عند الغليان kg/m^3	السعة الحرارية $J/kg.^{\circ}C$	الموصلية الحرارية $W/m.^{\circ}C$
الماء	0	100	0.0	960	4200	0.63
الثرمينول 66 (Therminol/66)	-27	343	2.0	750	2740	0.16
دويثرم A (Dowtherm A)	12	260	0.22	867	2200	0.112
هتيك (Hitec)	142	540	0.44	1680	1560	0.61
ملح منصهر	220	540	0.25	1733	1560	0.57
الصوديوم	98	760	0.57	960	1260	67.5

* الأسعار في عام 2002.

لكثير من المنظومات الشمسية، يعتبر الماء المادة المثالية لتخزين الطاقة الحرارية. والطاقة تُضاف أو تُسحب من وحدة الخزن بواسطة نقل وسط التخزين نفسه. إن نموذجاً لأنظمة تستخدم خزانات المياه مبينة في منظومة تسخين الماء في الشكل (3.5).



شكل (3.5) منظومة نموذجية تستخدم خزان ماء، ويدور الماء خلال المجمع لإضافة الطاقة وخلال الحمل لسحبها

إن سعة تخزين الماء (أو أي سائل أخر) للطاقة في وحدة التخزين عند درجة حرارة متجانسة (مخلوط جيداً، غير طبائقي) تعمل على فرق درجات الحرارة، وتُعطى بالعلاقة التالية:

$$q_s = (m\, c_p)_s\, \Delta T_s \qquad (1.5)$$

حيث: q_s، تمثل السعة الحرارية الكلية لكتلة الماء m في وحدة التخزين. ويعتمد مدى درجات الحرارة والتي تحدد النهاية الصغرى لعمل هذه الوحدة على احتياجات التطبيق. وتحدد النهاية العظمى بضغط البخار للسائل، والتي تمثل إحدى عيوب الماء كوسط خزن حراري. ويدرج الجدول (1.5) ميزات وعيوب خزانات الطاقة الحرارية المائية.

جدول (1.5) ميزات وعيوب الماء كوسط لخزن الطاقة الحرارية، (Kreith, Kreider, 1978)

الميزات	العيوب
متوفر بكثرة	ضغط بخار مرتفع
رخيص التكاليف	صعوبة في الحصول على التدرج الحراري لطبقات الماء
غير سام	شد السطح منخفض، يتسرب بسهولة
غير قابل للاحتراق	وسط يسبب الصدأ
خواص النقل جيدة	يتجمد وينشأ عنه تمدد مدمر
حرارة نوعية مرتفعة	ناقل للطاقة غير عازل
كثافة عالية	
سائل جيد مشترك كوسط تخزين ومائع عامل	
معروف طرق التحكم في التآكل	

لخزان جيد الخلط، كالمبين في الشكل (4.5)، فان اتزان الطاقة للخزان سيؤدي إلى:

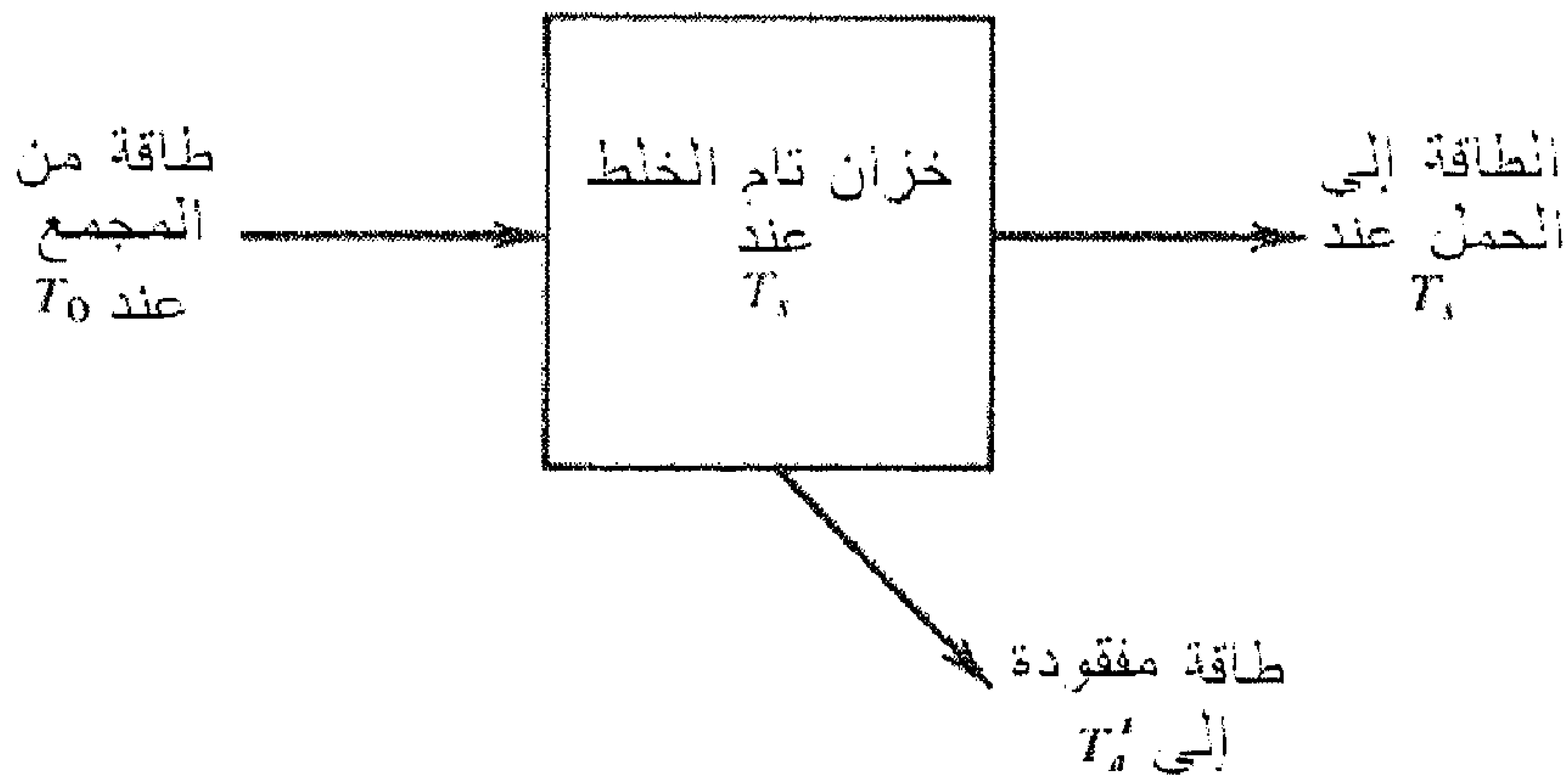
$$\left(m\, c_p\right)_s \frac{dT_s}{dt} = q_u - L_s - (U\,A)_s\,(T_s - T_a') \qquad (2.5)$$

حيث: q_u، L_s، معدلات الإضافة والسحب للطاقة من المجمع وإلى الحمل، على التوالي. T_a'، درجة حرارة الوسط المحيط بالخزان (والذي قد لا تكون درجة حرارة الهواء الجوي).

وبالتالي فان درجة حرارة الخزان يمكن الحصول عليها:

$$T_s^+ = T_s + \frac{\Delta t}{\left(m\,c_p\right)_s}\left[q_u - L_s - (U\,A)_s\,(T_s - T_a')\right] \qquad (3.5)$$

حيث T_s^+، درجة حرارة الماء في الخزان عند نهاية الساعة، T_s، درجة حرارة الماء عند بداية الساعة، q_u، L_s، المعدل الساعي للطاقة المفيدة المكتسبة من الطاقة الشمسية، والحمل، على التوالي.



شكل (4.5) الاتزان الحراري لخزان تام الخلط

أورد (Dickinson, et al., 1980) المقاومة الحرارية الكلية على وحدة سمك العازل (R_{th}/L) لبعض المواد العازلة المستخدمة في الخزانات، وهي مدرجة أدناه في

الجدول (2.5). ويمكن الحصول على معامل الفقد الحراري الكلي U، يمكن الحصول عليه من $(1/R_{th})$.

جدول (2.5) قيمة (R_{th}/L) لبعض مواد العزل

(R_{th}/L) m.K/W	المادة
24.3	ألياف زجاجية
34.7	لوح من رغوة البوليسترين
46.5	منتجات الرغوة البلاستيكية

المثال التالي يعرض كيفية تطبيق معادلة اتزان الطاقة على خزان للتنبؤ بدرجات حرارته كدالة في الزمن. في هذا المثال الأحمال والطاقة المفيدة المكتسبة من المجمع الشمسي معطاة بدلالة الزمن.

مثال 1.5

خزان مائي تام الخلط يحتوي على 1500 kg ماء. حاصل ضرب معامل الفقد الحراري الكلي في المساحة $11.1\,W/^{o}C$. الخزان يبدأ العمل عند $45^{\circ}C$ ولمدة 12 ساعة في غرفة بدرجة حرارة ثابتة $20^{\circ}C$، الطاقة q_u، تضاف إلى الخزان من المجمع الشمسي، والطاقة L_s، تُستنزف من الخزان لتغطية الحمل. العمود الأول في الجدول المدرج أسفله في الحل يشير إلى وقت نهاية الساعة، الأعمدة الثانية والثالثة تشير إلى قيم q_u، L_s، المناظرة للساعة. احسب درجة حرارة الخزان خلال 12 ساعة عمل.

الحل:

اتزان الطاقة للخزان في صورة النهايات المحددة كما في المعادلة (3.5). بإدخال الثوابت المناسبة، بخطوة زمنية مساوية الساعة، فنحصل على:

$$T_s^{+} = T_s + \frac{1}{1500 \times 4190}\left[q_u - L_s - 11.1 \times 3600\left(T_s - 20\right)\right]$$

هذه المعادلة تكرر كل ساعة. النتائج مدرجة في الجدول أسفله، حيث العمود الرابع تمثل درجات الحرارة القديمة والعمود الخامس يمثل درجات الحرارة الجديدة لنهاية الساعة المحسوبة من المعادلة.

T_s^+, °C	T_s, °C	L_s, MJ	q_u, MJ	الساعة
42.9	45	12	0	1
40.9	42.9	12	0	2
39.0	40.9	11	0	3
37.1	39.0	11	0	4
35.0	37.1	13	0	5
32.6	35.0	14	0	6
29.7	32.6	18	0	7
26.3	29.7	21	0	8
26.4	26.3	20	21	9
29.7	26.4	20	41	10
36.3	29.7	18	60	11
45.6	36.3	16	75	12

◁

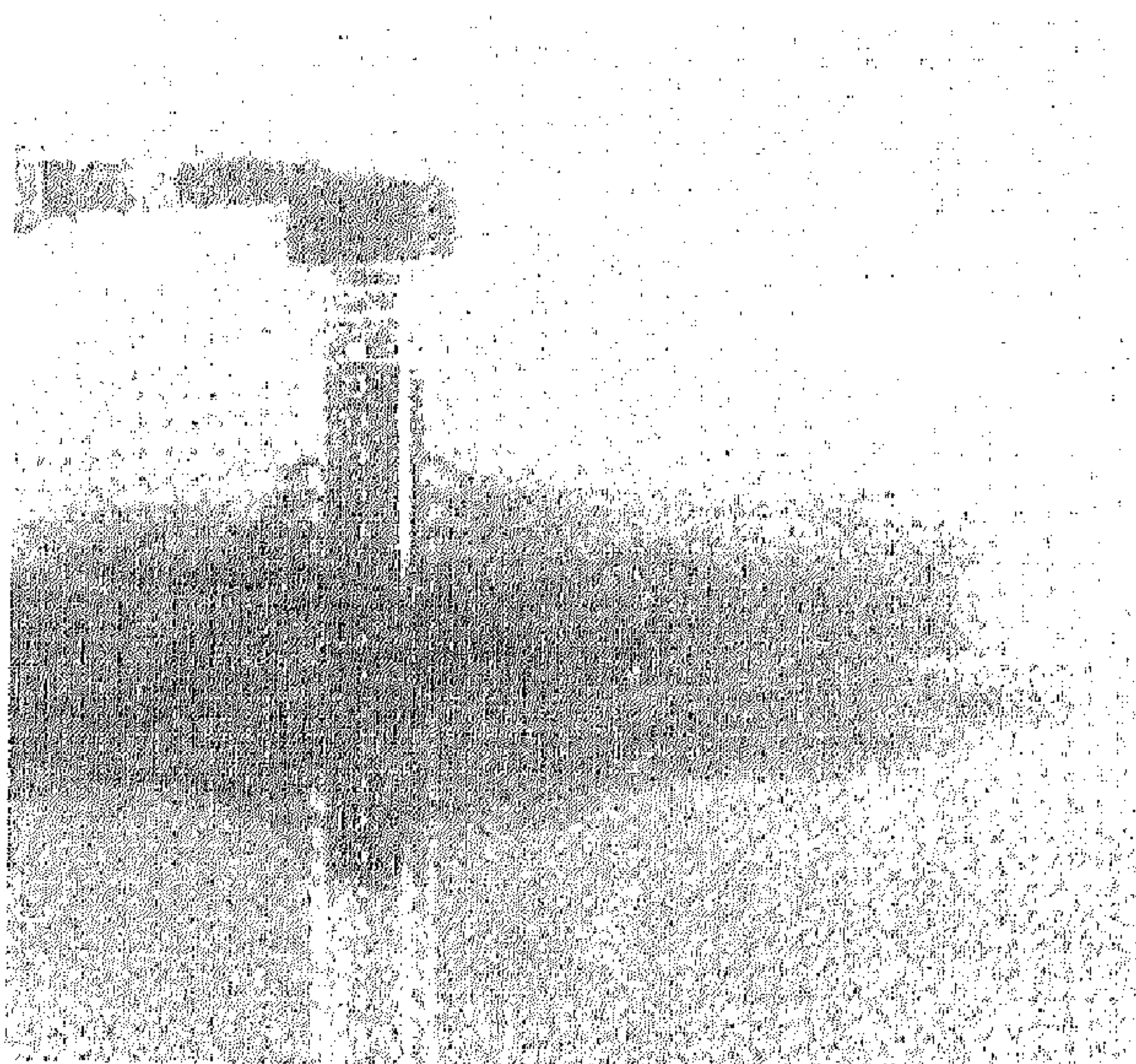
4.5 تحليل التدرج الحراري (الطبائقي) في الخزانات الحرارية المائية

في الخزانات الحرارية الكبيرة سيكون لتدرج درجات الحرارة في الخزان أثر كبير على سلوك المنظومة. وقد طورت العديد من النماذج الرياضية للتنبؤ بتدرج درجات الحرارة داخل الخزان. من بين هذه النماذج والأكثر استخداماً هو الاقتراب المتعدد العقد. في هذا الاقتراب يقسم الخزان إلى عدد N عقدة (أو جزء) والاتزان الحراري يوضع لكل جزء من الخزان، والنتيجة تكون فئة من المعادلات التفاضلية بعدد N، والتي يمكن حلها لإيجاد درجة حرارة العقد N كدالة في الزمن.

لتكوين معادلات الاتزان للاقتراب المتعدد العقد، من الضروري فرض كيفية دخول الماء إلى الخزان وتوزيعه على العقد المتعددة. على سبيل المثال لخزان بخمس عقد المبين في الشكل (5.5)، يدخل الماء من المجمع عند درجة حرارة T_{co} والتي تقع بين $T_{s,2}$ و $T_{s,3}$.

$T_{c,0}$ = 52C
T_{s1} = 58C
T_{s2} = 55C
T_{s3} = 50C
T_{s4} = 45C
T_{s5} = 35C

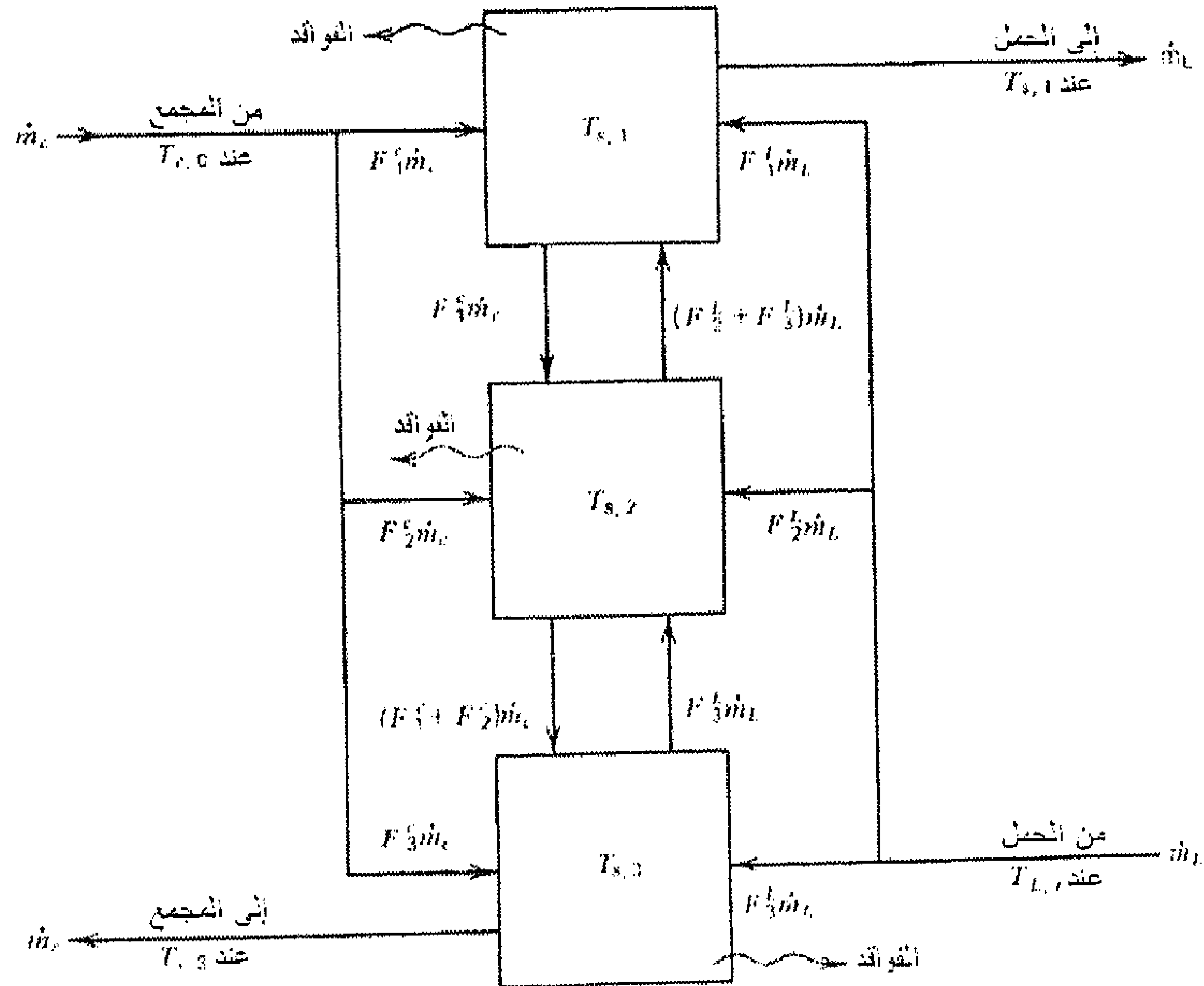
شكل (5.5) الافتراض القائم على خزان بخمس عقد وبدرجات حرارة على النحو التالي: $T_{s,2} > T_{co} > T_{s,3}$، ونتوقع دخول الماء إلى العقدة الثالثة خلال العقدتين الأولى والثانية



شكل (6.5) الماء الملون يدخل خزان طبائقي من خلال مصب مخفض للسرعة. من (Gari, et al., 1982)

فإنه يمكن فرض أن كل الكتلة ستجد طريقها داخل الخزان في العقدة 3، حيث كثافتها تقترب من تلك العقدة. (وهذا ما سيفعله الماء عند دخوله الخزان كما هو مبين بالتجربة في الشكل (6.5)، حيث يبين أن الماء الملون يدخل الخزان من مدخل مصب مصمم جيداً).

ولخزان من ثلاث عقد كما هو مبين في الشكل (7.5)، يكون التدفق إلى المجمع دائماً من أسفل الخزان، العقدة 3، والتدفق إلى الحمل يكون دائماً من أعلى، العقدة 1. بينما سيعثر التدفق العائد من المجمع على مكانه في العقدة التي تكون قريبة ولكنها أقل من درجة حرارته. بفرض أن درجات الحرارة العقد الثلاث هي على التوالي: 45، 35، 25 درجة مئوية، بطبيعة الحال، الطبقة الساخنة ستكون هي الأعلى. الماء القادم من المجمع بدرجة حرارة أقل 35°C سيذهب إلى العقدة الثالثة، أما إذا كانت درجة حرارة الماء بين 35,45°C فإن التدفق سيتجه نحو العقدة 2.



شكل (7.5) خزان مائي طبائقي ثلاثي العقد (Duffie, Beckman, 1991)

دالة التحكم بتدفق المجمع F_i^c يمكن تعريفها لتعيين أي عقدة ستستقبل الماء من المجمع:

$$F_i^c = \begin{cases} 1 & \text{if } \ \mathrm{i}=1 \ \text{and } T_{co} > T_{s,i} \\ 1 & \text{if } \ \mathrm{i}=\mathrm{n} \ \text{and } T_{s,i-1} \geq T_{co} > T_{s,i} \\ 0 & \text{if } \ \mathrm{i}=0 \ \text{or } \ \text{if } \ i=N+1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{4.5}$$

وعند عودة الماء من الحمل إلى الخزان فسيتبع نفس السلوك وذلك عن طريق دالة التحكم بتدفق الحمل F_i^L كالتالي:

$$F_i^L = \begin{cases} 1 & \text{if } \ \mathrm{i}=1 \ \text{and } T_{Lr} < T_{s,N} \\ 1 & \text{if } \ \mathrm{i}=\mathrm{n} \ \text{and } T_{s,i-1} \geq T_{Lr} > T_{s,i} \\ 0 & \text{if } \ \mathrm{i}=0 \ \text{or } \ \text{if } \ i=N+1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5.5}$$

وصافي التدفق بين العقد يمكن أن يعتمد على قيمة معدل التدفق إلى المجمع والحمل وقيمة دالتي التحكم في أي لحظة معينة. من المناسب تقريب معدل التدفق المختلط على أنه يمثل معدل التدفق الصافي في العقدة i من العقدة $i-1$، بتجاهل تأثيرات التدفق، في حالة وجودها، مباشرة من العقدة إلى الحمل:

$$\dot{m}_{m,1} = 0 \tag{6.5 أ}$$

$$\dot{m}_{m,i} = \dot{m}_c \sum_{j=1}^{i-1} F_j^c - \dot{m}_L \sum_{j=i+1}^{N} F_j^L \tag{6.5 ب}$$

$$\dot{m}_{m,N+1} = 0 \tag{6.5 جـ}$$

بدوال التحكم هذه، أي اتزان للطاقة في العقدة i يمكن صياغته على الصورة التالية:

$$m_i \frac{dT_{s,i}}{dt} = \left(\frac{UA}{c_p}\right)\left(T'_a - T_{s,i}\right) + F_i^c \dot{m}_c \left(T_{co} - T_{s,i}\right) + F_i^L \dot{m}_L \left(T_{L,r} - T_{s,i}\right) + \begin{cases} \dot{m}_{m,i}\left(T_{s,i-1} - T_{s,i}\right) & \text{if} \quad \dot{m}_{m,i} > 0 \\ \dot{m}_{m,i+1}\left(T_{s,i} - T_{s,i+1}\right) & \text{if} \quad \dot{m}_{m,i+1} < 0 \end{cases} \tag{7.5}$$

حيث أضيف الحد الذي يعتبر الفواقد U من العقدة i إلى المحيط عند درجة حرارة T'_a. وقيمة U يمكن تحديدها بالعلاقة التالية:

$$U = \frac{1}{\pi D_i}\left[\frac{1}{\pi D_i h_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k_{ins}} + \frac{1}{\pi D_o h_o}\right]^{-1} \tag{8.5}$$

حيث الرموز السفلية o,i تشير إلى الداخل والخارج، على التوالي.

k_{ins} = الموصلية الحرارية لمادة العازل

h_i = معامل انتقال الحرارة بالحمل الداخلي، ونحصل عليه من العلاقة المناسبة من معادلات انتقال الحرارة بالحمل الحر أو المختلط.

h_o = معامل انتقال الحرارة بالحمل الخارجي، في حالة تعرض الخزان للرياح يساوي:

$h_o = 5.7 + 3.8\,V_w$، حيث V_w، سرعة الرياح m/s. وفي حالة عدم وجود رياح (هواء ساكن) فيمكن تبني قيمة $h_o = 10\,\mathrm{W/m^2K}$، (Oliveski, et al., 2003)

رياضياً يمكن تمثيل التحليل الطبائقي لخزان مائي باعتبار عنصر تحكم بسمك dz من الخزان المبين في الشكل (8.5)، وبفرض خواص ثابتة، فان معادلة اتزان الطاقة يمكن أن تكون على الصورة التالية:



شكل (8.5) يمثل الموازنة الحرارية، تدرج درجات الحرارة، والمقاومة الحرارية لخزان الطبائقي المائي.

الطاقة الداخلة+(الانثالبي الداخل)-الطاقة الخارجية-(الانثالبي الخارج)-(الطاقة المفقودة)= (الطاقة المخزونة في عنصر التحكم)

$$-k\frac{\pi}{4}D_i^2\frac{\partial T}{\partial z}+(\dot m_1-\dot m_2)c_pT-\left[-k\frac{\pi}{4}D_i^2\frac{\partial T}{\partial z}-k\frac{\pi}{4}D_i^2\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}dz\right]-$$

$$\left[(\dot m_1-\dot m_2)c_pT+(\dot m_1-\dot m_2)c_p\frac{\partial T}{\partial z}dz\right]-U_i\pi D_i dz[T-T_a'(\tau)]=$$

$$\rho c_p\frac{\pi}{4}D_i^2dz\frac{\partial T}{\partial t}$$

بتجميع الحدود المتشابهة فسنحصل على المعادلة التفاضلية من الدرجة الثانية التالية:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}-\frac{4(\dot m_1-\dot m_2)c_p}{\pi k D_i^2}\frac{\partial T}{\partial z}-\frac{4U_i}{D_i k}[T-T_a'(\tau)]=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (9.5)$$

تحت الشروط الحدودية التالية:

عند $\tau=0$, $z=z$, $T=T_o(z)$ (10.5 أ)

عند $\tau>0$, $z=0$

(الانثالبي الداخل)-(الفاقد إلى المحيط من السطح العلوي)-(مجموع الانثالبي الخارج)-(التوصيل الحراري في العنصر)=(الطاقة المخزونة في العنصر)

أو:

$$\dot m_1 c_pT_c(\tau)-(UA)_t[T(0,\tau)-T_a'(\tau)]-U_i\pi D_i\frac{dz}{2}[T(0,\tau)-T_a'(\tau)]-$$

$$\dot m_2 c_pT(0,\tau)-(\dot m_1-\dot m_2)c_pT(0,\tau)+\frac{\pi D_i^2}{4}k\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial z}=$$

$$\rho c_p\frac{\pi D_i^2}{4}\frac{dz}{2}\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial t}$$

(10.5 ب)

وأيضاً عند $\tau>0$, $z=L$, (10.5 ج)

وبنفس الطريقة:

$$(\dot{m}_1-\dot{m}_2)c_pT(L-dz,\tau)-(UA)_b[T(L,\tau)-T'_a(\tau)]-$$
$$U_i\pi D_i\frac{dz}{2}[T(L,\tau)-T'_a(\tau)]+\dot{m}_2c_pT_L(\tau)-\dot{m}_1c_pT(L,\tau)-$$
$$\frac{\pi D_i^2}{4}k\frac{\partial T(L-dz,\tau)}{\partial z}=\rho c_p\frac{\pi D_i^2}{4}\frac{dz}{2}\frac{\partial T(L,\tau)}{\partial t}$$

حيث الرموز السفلى، i ,o ,t ,b، تشير إلى الداخلي، الخارجي، العلوي والسفلي، على التوالي. باقي الرموز معرفة على الشكل (8.5).

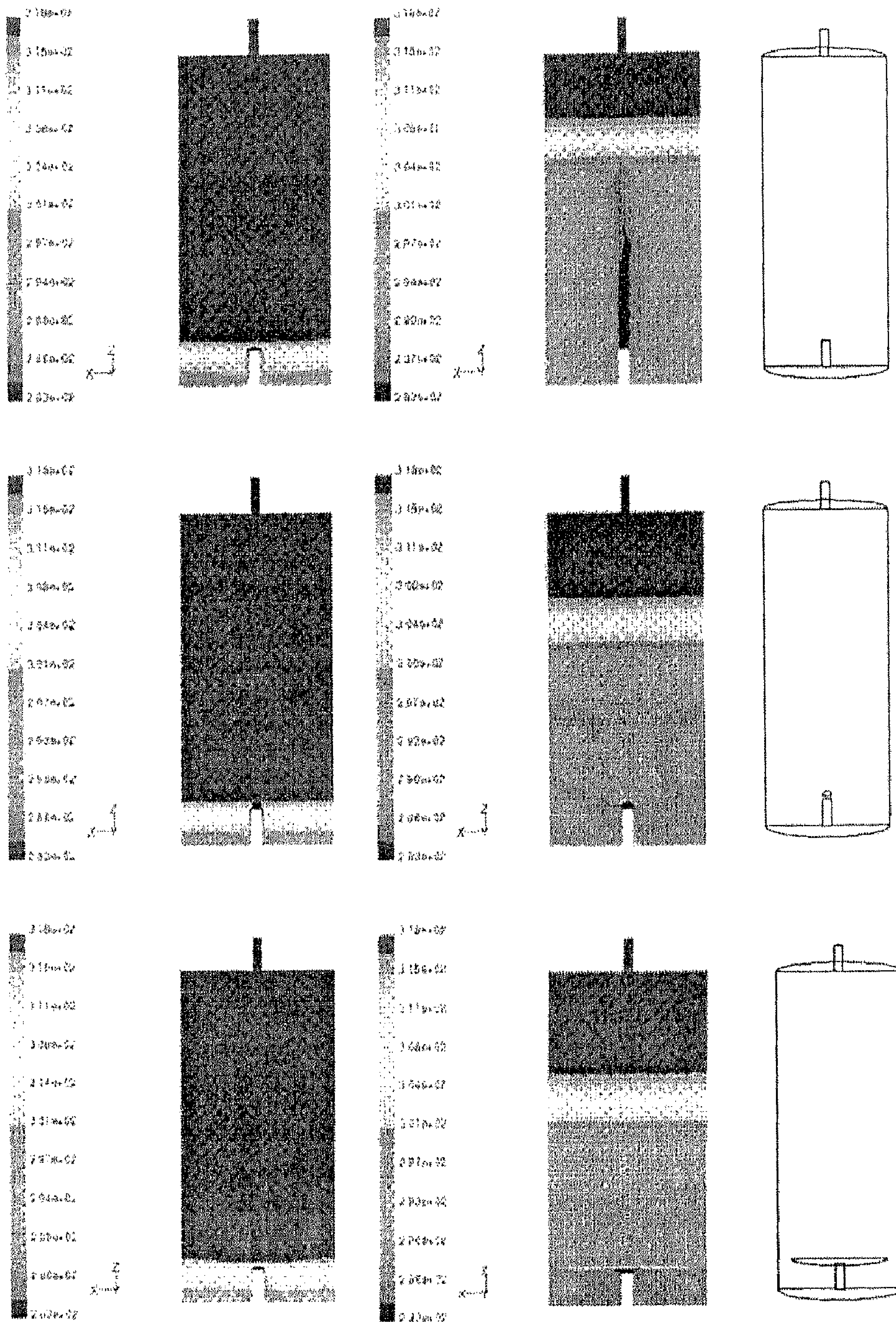
كما هو واضح مما سبق، فان التحليل الطبائقي للخزان الحراري معقد. ومن الأفضل الحفاظ على تدرج درجات الحرارة داخل الخزان ولهذا فان العديد من الإجراءات قد تتخذ للحفاظ على ذلك التدرج. إن الحد من اضطراب دخول الماء عند المدخل في الخزان قد يكون خطوة فعالة في تقليل دمج الماء البارد (الداخل) مع الماء الساخن (المخزن في الخزان)، وذلك بوضع صحيفة معدنية عند المدخل لتقلل من سرعة الماء الداخل (Zachar, et al., 2003). ونتائج تجربة (Shah, et al., 2003)، تبين مدى فعالية هذا الإجراء، كما هو مبين بالشكل (9.5). وللمزيد من المعلومات يجب الرجوع إلى الورقة الأصلية. ويمثل الشكل (9.5) الثلاثة أنماط من الخزانات الحرارية المائية بمداخل ذات أشكال مختلفة (العمود الأول من اليمين)، أما العمودين الثاني والثالث فيمثلان تدرج درجات حرارة الماء في الخزان لمدة 5 دقائق وذلك عند معدل تدفق ماء إلى الخزان 1 l/min ,10 l/min، على التوالي.

في حالة المنظومات الشمسية الصغيرة، (على سبيل المثال المنظومات الشمسية)، ذات خزان حراري صغير، فإن التدرجات الحرارية داخل الخزان ليست ذات أهمية كبيرة، كما هو مبين لحالة خاصة في الشكل (10.5). وبالتالي يمكن لأغراض التصميم تبني تحليل الخلط الجيد لهذا الغرض (Nassar, 1999).

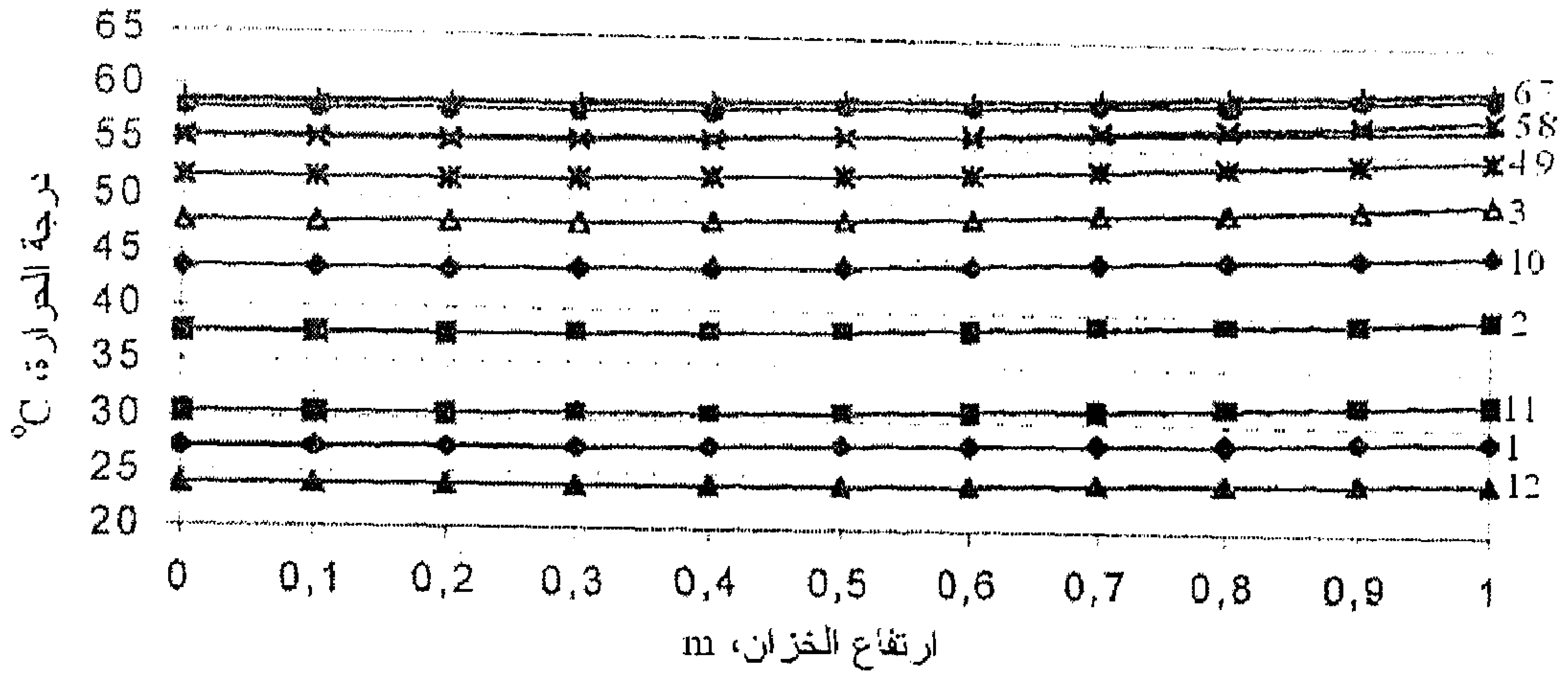
5.5 حجم الخزان الحراري

يعتبر تعيين حجم الخزان الحراري من المسائل المهمة في تصميمات المنظومات الشمسية. لأنها تقع ضمن منطقة تقاطع الحدود الحرارية، الاقتصادية والاجتماعية. حرارياً، يعتمد حجم الخزان على ظروف التشغيل من أحمال والطاقة المفيدة المكتسبة من المجمعات الشمسية والطاقة المفقودة إلى المحيط، فكلما زاد حجم الخزان زادت كمية الحرارة المخزونة ولكن أيضاً زادت معه الطاقة المفقودة. بالإضافة إلى التناسب الطردي للحجم مع السعر. أما اجتماعياً، فكبر الخزان سيسبب مشكلة في ايجاد مكان مناسب له في المنزل. ولهذا السبب وجب عمل تسوية بين كل هذه الحدود. الحقيقة أنها لا توجد أي قوانين تحكم هذه القيود مجتمعة، ولهذا فان تقنية المحاولة والخطأ قد تبدو ملائمة للوصول إلى التسوية المرضية لجميع الأطراف.

ومن الأبحاث الكثيرة، لمنظومات التسخين الشمسية المنزلية، فانه يمكن استخدام، وبصورة عامة، المدى من 0.05 إلى 0.07 متر مكعب ماء لكل 1 متر مربع مساحة مجمع شمسي. واستخدام خزان في هذا المدى سيحدد استخدام الطاقة الاحتياطية في حوالي 30% من الطاقة المطلوبة للحمل. إن زيادة حجم الخزان أكثر من ذلك المدى لن يؤدي إلى تقليل استهلاك الطاقة الاحتياطية بصورة معتبرة، وبذلك قد تكون تلك الزيادة في الحجم عديمة النفع من الناحية الاقتصادية.



شكل (9.5) أنماط الخزانات ونتائج التجربة التي أجراها (Shah, et al., 2003)، لمدة 5 دقائق بمعدلات تدفق، 1، 10 لتر لكل دقيقة ، ونوع الخزان، من اليسار إلى اليمين على التوالي



شكل (10.5) توزيع درجات حرارة الماء في خزان حراري عند الساعة 11:00 ليوم 21 من كل شهر، لمنظومة شمسية لتسخين الهواء

أقترح (Elsayed, et al., 1981) استخدام المعادلة التالية لإيجاد حجم الخزان:

$$V = \frac{q_L \Delta\tau}{\rho c_p \Delta T} \tag{11.5}$$

حيث: $\Delta\tau$ = الفترة الزمنية التي خلالها يكون الحمل q_L يتغذى فقط من الطاقة المخزونة.

ΔT = فرق درجات الحرارة العظمى والصغرى المسموح بهما للماء في الخزان.

أشار (Nassar, Salem, 2002) إلى أنه في حالة ما يكون الحمل كبير ومستمر فانه لا ضرورة لوجود خزان حراري في المنظومة. أي أن المنظومة ستعمل بكفاءة أعلى وبسعر أقل ويكون معامل التغطية لها أكبر من تلك التقليدية (بوجود الخزان) لمساحة صغيرة من المجمعات الشمسية.

6.5 كفاءة الخزان

إن سحب الطاقة من منظومة الخزن عادة ما يكون أقل من الطاقة المخزونة، كنتيجة للفواقد ولإنعكاسية النظام الملازمة لعمليات تخزين وسحب الطاقة. والأهم

من ذلـك أن الطاقـة تتـدرج في عمليـة التخـزين (كـدرجات الحـرارة علـى طـول الخزان)، وبالتالي تُسحب الطاقة عند درجات حرارة أقـل مـن تلـك الـتي خُزنـت عندها سلفاً.هذان العاملان، الكمية والطبائقية، يجب أن يتم أخذهما بالحسبان عند تعريف كفاءة عملية التخزين. وقـد عـرف (Turner, et al., 1980) هـذه العلاقـة وصاغها في الصورة التالية:

$$\eta_s = \frac{q_L \times \eta_{th,L}}{q_c \times \eta_{th,c}} \qquad (12.5)$$

حيث η_s، كفاءة الخزان، $\eta_{th,L}$، الكفاءة الحرارية عندما تكون درجة حـرارة المـاء الخارج من الخزان عند T، $\eta_{th,c}$، الكفاءة الحرارية عندما تكون درجة حرارة المـاء الداخل إلى الخزان عند T، و T، درجـة حـرارة الخـزان. $\eta_{th,L}$، $\eta_{th,c}$، يمكـن أن تؤخذ عامة مثل كفاءة دورة كارنت.

بينما قدم (Shah, et al, 2003) كفاءة التخزين علـى أنهـا النسـبة بـين فـرق الانتروبي المثالي على الحقيقي:

$$\eta_s = \frac{(s_0 - s_1)_{ideal}}{(s_0 - s_1)_{actual}} \qquad 0 < \eta_s < 1 \qquad (13.5)$$

الأرقام 0، 1 تشير إلى تغير الحالة، على سبيل المثال تغير الطاقة المتاحة عند الحالة 1، والتي يمكن أن تكون عند أي وقت إلى الحالة 0 وهي الحالة التي يكون فيهـا الخـزان مفرغاً تماماً من الطاقة.

كما عرف Louise أيضاً كفاءة الأكسيرجي للخزان على أنها نسبة الأكسيرجي المتاح في الحالة الحقيقية على الأكسيرجي في الحالة المثالية:

$$\eta_\xi = \frac{\xi_{1-0,actual}}{\xi_{1-0,ideal}} \qquad 0 < \eta_\xi < 1 \qquad (14.5)$$

7.5 وسائط التخزين الصلبة

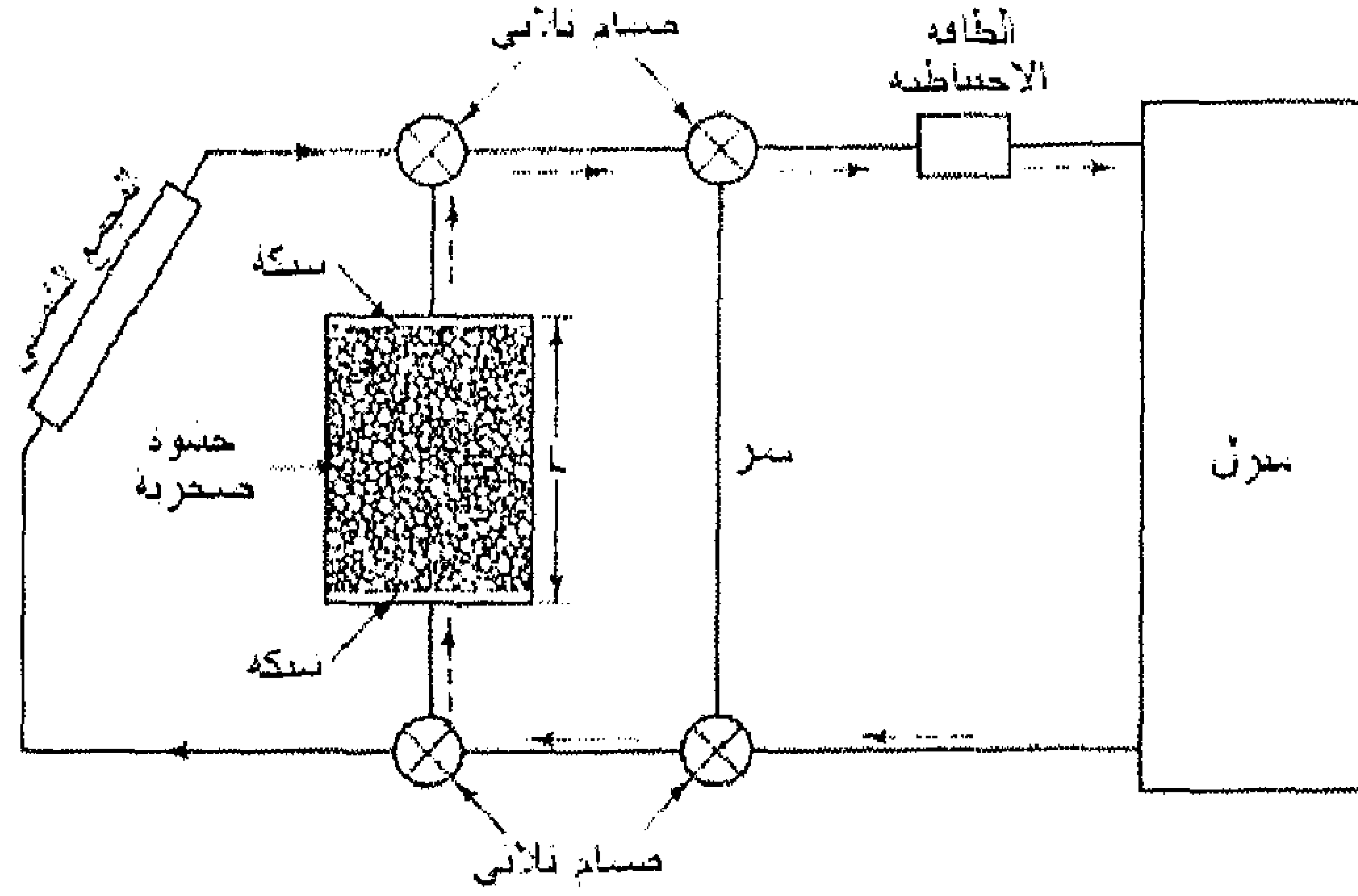
تتميز المواد اللاعضوية الصلبة بضغطها المنخفض في درجات الحرارة العالية، وخمولها الكيمائي، ورخص سعرها. ولكن لمعظم هذه المواد حرارة نوعية وموصلية حرارية منخفضة، ولذا فإنها تتطلب حجوم خزن كبيرة، ومنظومات تبادل حراري معقدة مما يزيد من الكلفة الابتدائية للمنظومة. ويبين الجدول (3.5) أن الصخور، ومادة الرمل هما أفضل المواد المستخدمة، وذلك لسعتهما الحرارية المقبولة ورخص سعرهما.

جدول (3.5) الوسائط الصلبة لخزن الحرارة المحسوسة

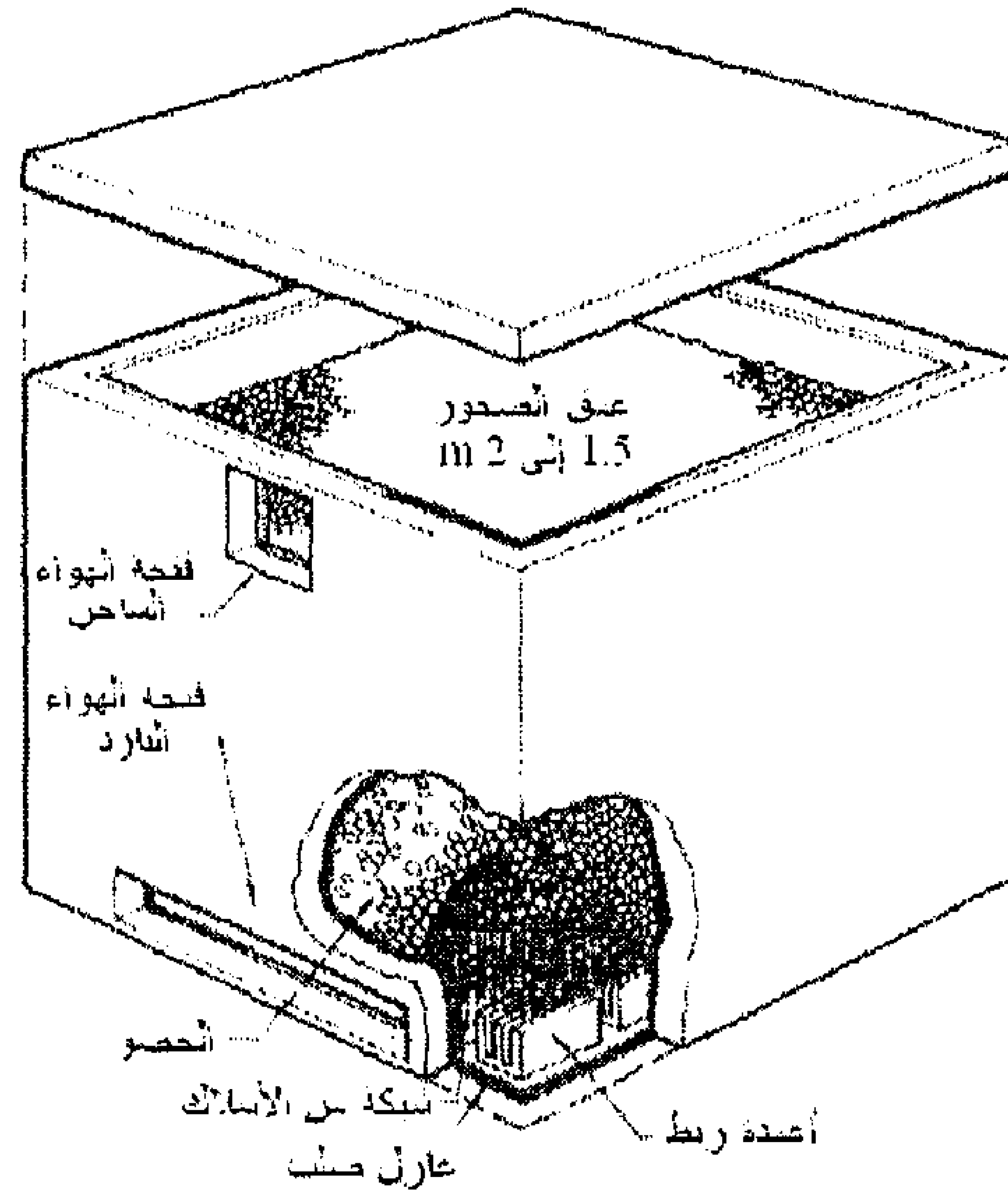
السعر* $\$/kg$	درجة الذوبان $°C$	السعة الحرارية $J/kg.°C$	الكثافة kg/m^3	وسط الخزن
0.01	1200	880	2640	الصخور
0.01	1728	910	2650	الرمل
0.66	1535	837	7900	برادة حديد
0.32	2700	1130	3580	أكسيد المغنيز MgO
0.43	2015	1010	3970	أكسيد الألمونيوم AL_2O_3

* الأسعار في عام 2002.

في منظومات تسخين الهواء الشمسية، غالباً ما تستخدم طبقات من الحصو محشوة في وعاء كوحدة لخزن الطاقة. الحصو، وهو عبارة عن فتات الصخور بأقطار صغيرة لا تتجاوز بعض السنتميترات، يعبأ في وعاء جيد العزل. يدور الهواء خلال المسامات بين الحصو وينتج عنه انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي أو القسري بين الهواء والصخور. ويوضح شكل (11.5) رسماً تخطيطياً لمنظومة تسخين هواء شمسية بوحدة خزن صخرية، وكذلك أنماط التشغيل المختلفة من شحن وتفريغ جزئي وكلي.



(أ)



(ب)

شكل (11.5) منظومة تسخين هواء شمسية (أ) وبيان وحدة تخزين صخرية (ب)

بخلاف خزانات الطاقة السائلة، فان التحليل الطبائقي لخزانات الحصو يمكن بسهولة عرضها، ويعتبر هذا من ميزات المنظومات الهوائية. وسنقوم بوصف المعادلات الأساسية للتدرج الحراري داخل الخزان الصخري لمنظومات تسخين

الهواء الشمسية. وقد أدرجت في الجدول (4.5) ميزات وعيوب استخدام نظام الخزن بالوسائط الصلبة.

جدول (4.5) ايجابيات وسلبيات خزان الحصو (Sharma, et al., 1991)

الميزات	العيوب
1. المادة متوفرة وبسعر منخفض. 2. يمكن خزن الحرارة بدرجات حرارة عالية جداً. 3. حاوية الخزن غير معرضة للصدأ. 4. لا توجد حاجة إلى مبادل حراري.	1. الحرارة النوعية للهواء وللصخور قليلة ولذا فان حجم الخزان يكون كبيراً.

في تحليل الخزانات الصخرية، يجب أن ندرك أن كلاً من الحصو والهواء يتبادلا الحرارة في اتجاه تدفق الهواء، وغالباً ما يكون هناك اختلاف في درجات الحرارة بين الحصو والهواء. وهكذا، يصبح من الضروري اشتقاق معادلات الاتزان الحراري منفصلة لكل من الحصو والهواء. بفرض أن التدفق القسري للهواء أحادي البعد، خواص النظام ثابتة، التوصيل على طول حشوة الحصو مهمل، وعدم حدوث فقد حراري مع المحيط. فإن السلوك الحراري للحصو والهواء، على التوالي، يمكن وصفه بالمعادلات التفاضلية المترابطة التالية:

$$A\,\rho_b\,c_b\,(1-\in)\frac{\partial T_b}{\partial t} = A\,h_v\left(T_f - T_b\right) \qquad (15.5)$$

$$A\,\rho_f\,c_f \in \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\dot{m}\,c_f\,\frac{\partial T_f}{\partial x} - A\,h_v\left(T_f - T_b\right) \qquad (16.5)$$

حيث: T_b = درجة حرارة الحصو، $^\circ C$

T_f = درجة حرارة الهواء، $^\circ C$

ρ_b = كثافة مادة الحصو، kg/m^3

ρ_f = كثافة الهواء، kg/m^3

c_b = الحرارة النوعية لمادة الحصو، J/kg.K

c_f = الحرارة النوعية للهواء، J/kg.K

t = الزمن، s

x = الموضع على طول الحشوة في اتجاه التدفق، m

$\dot{m}$ = معدل تدفق الهواء، kg/s

$\in$ = نسبة الفراغ (المسامية) في الحشوة، (حجم الفراغ/الحجم الكلي للحشوة)

h_v = المعامل الحجمي لانتقال الحرارة بالحمل، W/m^3K

وتتمثل في المعادلة التجريبية التالية: $h_v = 650(G/d)^{0.7}$

حيث: G، معدل سرعة كتلة المائع kg/s على وحدة المساحة السطحية للحصوة A_f، وتحسب من (Thakur, et al., 2003)، كالتالي:

$$G = \frac{\dot{m}}{A_f \in}$$

و d قطر الحصوة، m.

A = مساحة مقطع طبقة الصخور، m^2

$$A = \frac{4 A_f L(1-\in)}{d}$$

إذا كان استيعاب الخزان للهواء في الحشوة الصخرية مهمل، فان معادلة (16.5) تُختزل إلى:

$$\dot{m}\, c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = A\, h_v \left(T_f - T_b\right) \tag{17.5}$$

والمعادلات (15.5) و (17.5) يمكـن إعـادة صياغتهما بدلالـة عـدد وحـدات انتقال الحرارة (NTU) كالتالي:

$$\frac{\partial T_b}{\partial (t/\tau)} = NTU \left(T_f - T_b\right) \tag{18.5}$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial (x/L)} = NTU \left(T_f - T_b\right) \tag{19.5}$$

$$NTU = \frac{h_v\, A\, L}{\dot{m}\, c_f} \tag{20.5}$$

$$\tau = \rho_b\, c_b \left(1 - \in\right) A\, L / \dot{m}\, c_f \quad , \quad s \tag{21.5}$$

حيث L يمثل طول حشوة الحصو في اتجاه سريان الهواء، m .

يمكن تضمين حد الفقد الحراري مـن الخـزان مـع المحيط في المعادلـة (19.5)، وبهذا تصبح المعادلة:

$$\frac{\partial T_f}{\partial (x/L)} = NTU \left(T_f - T_b\right) + \frac{U\, P\, L}{\dot{m}\, c_f}\left(T_a' - T_f\right) \tag{22.5}$$

حيث:
U = معامل فقد الطاقة من الخزان إلى المحيط، $W/m^2 K$
P = محيط الخزان، m
T_a' = درجة حرارة الهواء المحيط، $^\circ C$

ومعادلات التفاضـل الجزئيـة (18.5)، (22.5)، يمكـن حلـها بواسـطة تقنيـة الفروق المحـددة بمسـاعدة الحاسـوب. وقـد تمكّـن (Hughes, et al., 1976) مـن تشكيل نمط لمحاكاة نظام شمسي لتسخين الهواء. باستخدام هاتين المعادلتين ومعرفة

الحمل يمكن إيجاد الأداء الحراري الطويل الأمد لمنظومة التخزين. حيث وجد أن أداء المنظومة يصبح حساساً لمعامل NTU للقيم الأكبر من 10، والتي تشمل معظم الخزانات الصخرية العملية. وعليه فإن المعادلتين (18.5) و (22.5) تصبحان معادلة واحدة، كالتالي:

$$\frac{\partial T}{\partial(t/\tau)} = -L\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{U\,P\,L}{\dot{m}\,c_f}(T'_a - T) \qquad (23.5)$$

حيث $T_f = T_b = T$، وبهذا بدلاً من معادلتين تفاضليتين لنموذج معامل NTU لامتناهي تصبح معادلة تفاضلية واحدة.

معادلة (23.5) يمكن أن تحل باستخدام طريقة الفروق المحددة. ودقة هذه الطريقة تعتمد على عدد الأجزاء N، وهي عدد عناصر التحكم في الحشوة، فكلما زادت N كان الحل أكثر دقة، ولكن هذا سيزيد وقت الحساب. من خلال الخبرة وجد أن $N = 5$ تمثل العدد الأفضل من حيث الدقة وتوفير زمن الحساب. وبين (Philips, 1981) أن تأثير الطبائقية (تدرج درجات الحرارة) في الخزان الصخري يمكّن بدقة الحصول عليه من خلال تعريف معامل التدرج. ومعامل التدرج هذا يمكن تعريفه على أنه النسبة بين الطاقة المفيدة الحقيقية المكتسبة إلى الطاقة المكتسبة التي يمكن تحقيقها إذا لم يكن هناك تدرج حراري في الخزان. إذا كانت NTU كبيرة، فان محاكاة دائرة المجمع ـ الخزان في حالة الشحن تشير إلى أن معامل التدرج K_s يمكن أن يُصاغ كدالة في متغيرين لابعديين، وهما:

E، وتمثل نجاعة التبادل الحراري للمجمع الشمسي

$$E = \frac{F_R\,A_c\,U_c}{\dot{m}\,c_p} \qquad (24.5)$$

M ، عدد الخلط

$$M = \frac{Ak}{(\dot{m} c_p)L} + \frac{1}{NTU} \qquad (25.5)$$

حيث: F_R = معامل الإزاحة الحرارية للمجمع

A_c = مساحة المجمع الشمسي، m^2

U_c = معامل الفقد الحراري الكلي للمجمع، W/m^2K

$\dot{m}$ = معدل تدفق الهواء، kg/s

c_p = الحرارة النوعية للهواء، J/kg.K

A = مساحة مقطع الحشوة الصخرية، m^2

k = الموصلية الحرارية لمادة الحشوة، W/m.K

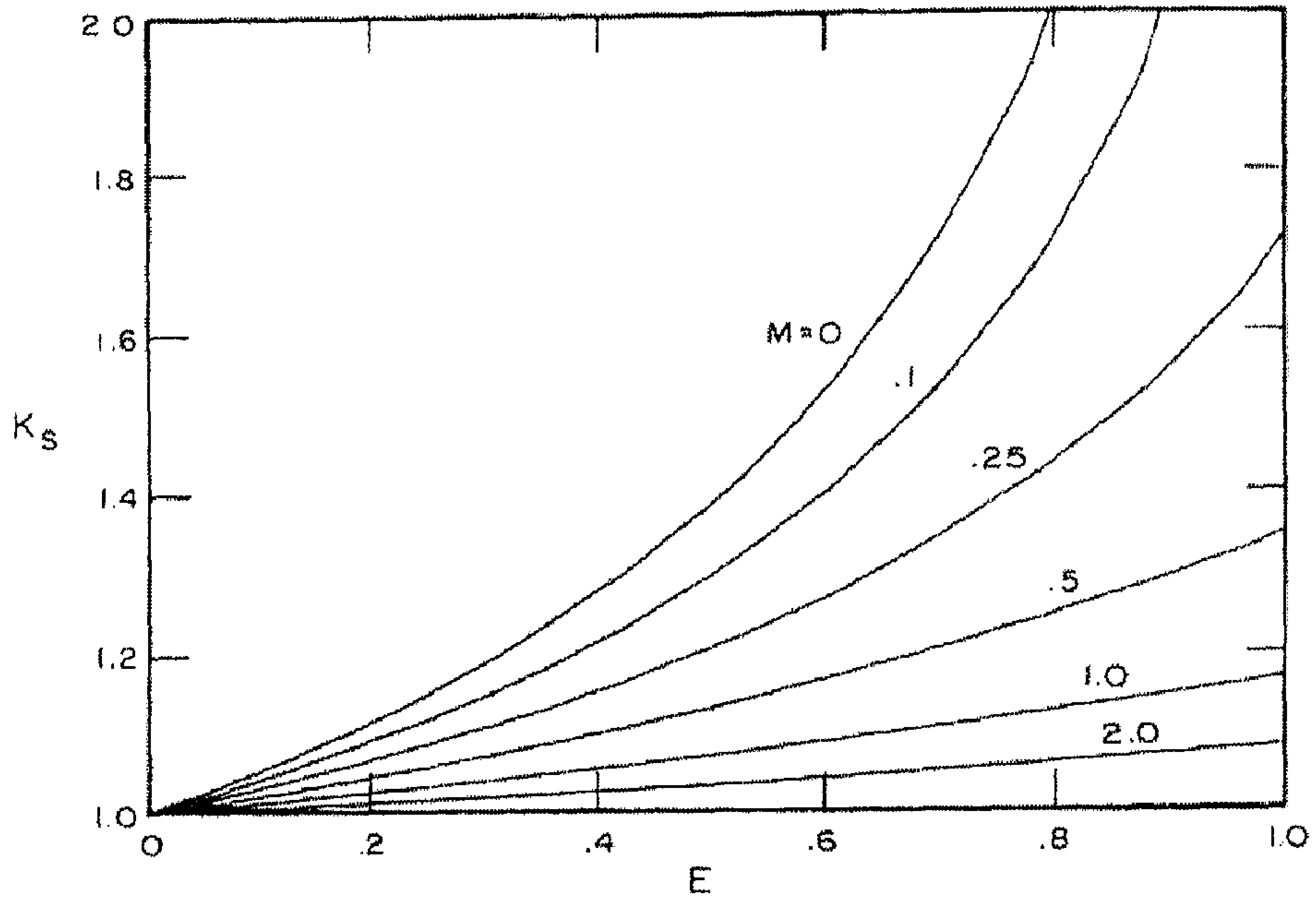
L = ارتفاع الحشوة الصخرية، m

NTU = عدد وحدات انتقال الحرارة لحشوة الخزان، لابعدي

إن علاقة معامل التدرج K_s، بالمتغيرين E ، M مبينة بالشكل (12.5). لمعظم أنظمة تسخين الهواء الشمسية، حيث $E \cong 0.01-0.5$ ، $M \cong 0-0.1$ ، ولذا فان معامل التدرج للخزانات الصخرية يقع بين $K_s \cong 1.0-1.4$ ، ولمعظم أنظمة الخزن الحرارية الجيدة التصميم تكون $K_s > 1.2$.

عدد وحدات انتقال الحرارة للخزانات الحرارية الجيدة التصنيع يكون كبيراً جداً، والموصلية الحرارية للصخور صغيرة جداً، وبهذا ومن المعادلة (25.5) يمكن رؤية أن قيمة M ستكون صغيرة جداً للتطبيقات العملية. لمثل هذه الحالة (M صغيرة) فانه من الممكن الحصول على معادلة لمعامل التدرج، على الصورة التالية:

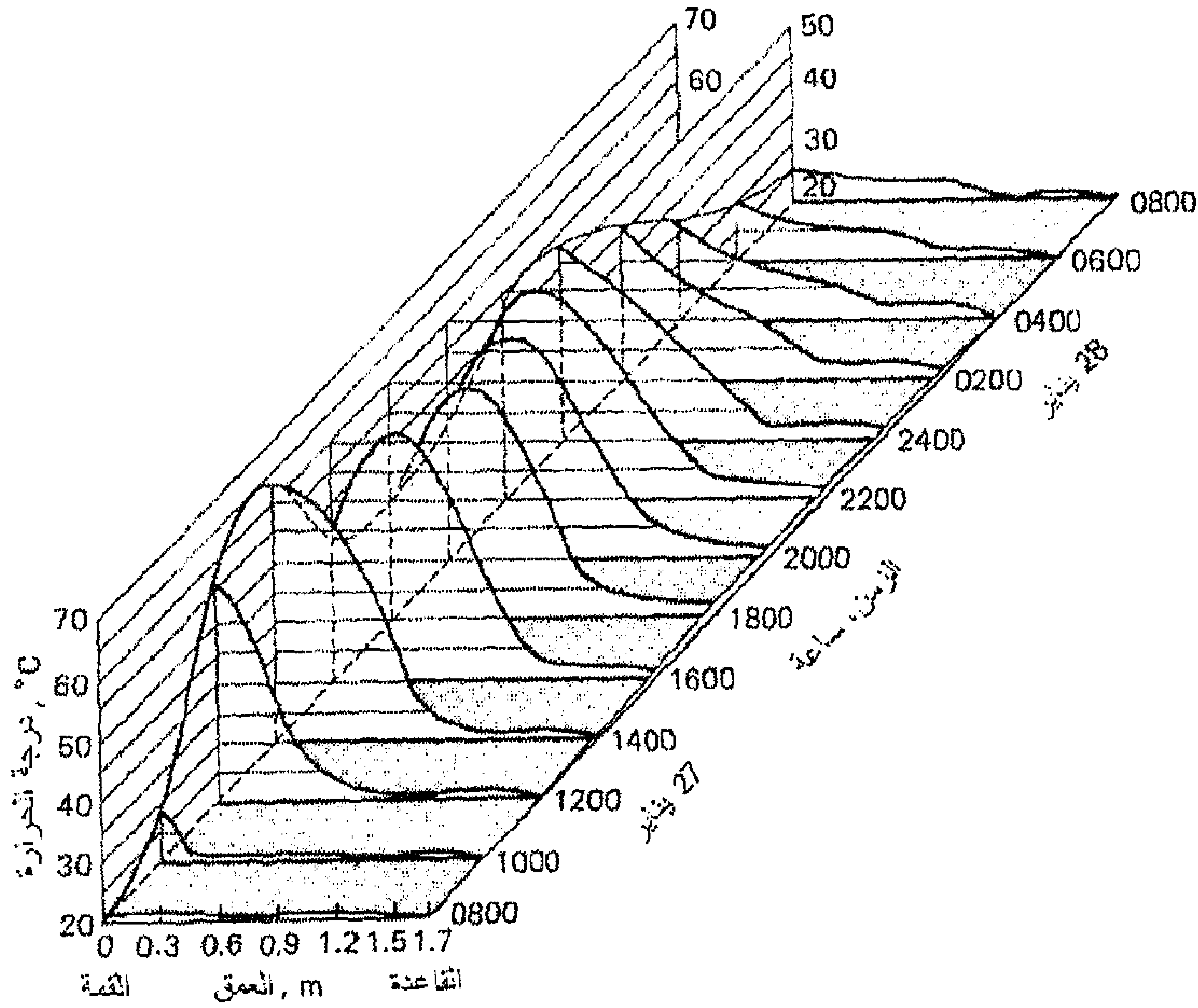
$$K_s = \frac{\ln[1/(1-E)]}{E\{1 + M \ln[1/(1-E)]\}} \qquad (26.5)$$



شكل (12.5) معامل التدرج K_S كدالة في E و M، (Philips, 1981)

ونتائج هذه المعادلة مقبولة الدقة لقيم M أصغر من 0.1، وهو الحد الأعلى لكل الخزانات الصخرية العملية. وبهذا فان المعادلة (26.5) يمكن استخدامها لكل منظومات تسخين الهواء الشمسية الحقيقية.

السلوك الحراري لمنظومة تخزين صخرية لمنزل بجامعة ولاية Colorado مثلت في الشكل (13.5) خلال فترة الشحن والتفريغ، (Karaki, 1977).



شكل (13.5) السلوك الحراري لمنظومة تخزين صخرية خلال فترة الشحن والتفريغ

مثال 2.5

منظومة شمسية لتسخين الهواء بمساحة مجمعات شمسية هوائية مستوية $60m^2$ و $12m^3$ خزان صخري. معامل الفقد الحراري الكلي للمجمع $7W/m^2K$، معامل الازاحة الحراري 0.58، ومعدل تدفق الهواء $0.55kg/s$. الحشوة الصخرية بارتفاع $2.2m$. والمعامل الحجمي لانتقال الحرارة في الحشوة $2000W/m^3K$ والموصلية الحرارية لمادة الحشوة $0.0025W/m\,K$. أوجد معامل التدرج في الحشوة الصخرية للخزان.

الحل

فعالية التبادل الحراري للمجمع تُحسب من المعادلة (24.5)

$$E=\frac{F_R A_c U_c}{\dot{m}c_p}=\frac{0.58\left(60\,\text{m}^2\right)\left(7\,\text{W/m}^2\text{K}\right)}{(0.55\,\text{kg/s})(1010\,\text{J/kg K})}=0.44$$

عدد وحدات انتقال الحرارة للخزان تُحسب من المعادلة (20.5)

$$NTU=\frac{h_v A L}{\dot{m}c_f}=\frac{\left(2000\,\text{W/m}^3\text{K}\right)\left(12\,\text{m}^3\right)}{(0.55\,\text{kg/s})(1010\,\text{J/kg K})}=43$$

عدد الخلط يُحسب من المعادلة (25.5)

$$M=\frac{A k}{\left(\dot{m}c_p\right)L}+\frac{1}{NTU}=\frac{\left(12/2.2\,\text{m}^2\right)(0.0025\,\text{W/m K})}{(0.55\,\text{kg/s})(1010\,\text{J/kg K})(2.2\,\text{m})}+\frac{1}{43}=0.0233$$

في النهاية، المعادلة (26.5) ستعطينا معامل التدرج:

$$K_s=\frac{\ln[1/(1-E)]}{E\{1+M\ln[1/(1-E)]\}}$$

$$K_s=\frac{\ln[1/(1-0.44)]}{0.44\{1+0.0233\ln[1/(1-0.44)]\}}=1.30$$ ◁

هذا يعني أن التدرج في الحشوة سيودي إلى 30% زيادة في الأداء الحراري للمنظومة على أدائه بدون تدرج حراري في الخزان.

8.5 تقدير حجم الخزان

يمكن حساب حجم الخزان بواسطة محاولة عدة أحجام حتى الوصول إلى الحجم الاقتصادي. وهذا الإجراء طويل. وكمنظومات التخزين المائية، فإن حجم الخزان يتراوح من $0.23 \div 0.15\ \text{m}^3$ لكل m^2 مساحة من المجمعات الشمسية، وهذا الخيار سيحدد وظيفة الطاقة الاحتياطية في حدود 30% من الطاقة المطلوبة لتغطية الحمل الكلي.

ولقد اقترح (Coutier, et al., 1982) إجراء تصميمي لتعيين حجم الخزان، بالإضافة إلى بعض المعلومات التصميمية المهمة. هذه المعلومات تتضمن قطر الحصو وارتفاع الحشوة. وهذه الطريقة ملخصة في الخطوات التالية:

(1) حساب حجم الحشوة من المعادلة التالية:

$$V = \frac{n_1 q_s}{\rho_b c_b (1-\in) \Delta \overline{T}_b} \qquad (26.5)$$

حيث: V = حجم الخزان، m^3

$n_1 q_s$ = القيمة التصميمية للطاقة المخزونة لطور التفريغ. وتساوي الطاقة المخزونة في وقت محدد kWh, q_s على وحدة الزمن مضروب في عدد وحدات الزمن n_1.

$\Delta \overline{T}_b$ = الارتفاع في متوسط درجات حرارة الحصو خلال عدد n_1 من وحدات الزمن، K. وتتراوح هذه القيمة 5-20 $^\circ C$.

تعتبر $\Delta \overline{T}_b$ قيمة تصميمية والتي تُختار ويجب بعدها أن تُختبر بواسطة مقارنتها بالزيادة الحقيقية لدرجة حرارة الصخور.

(2) تعيين قيم G، d، بحيث يكون انخفاض الضغط في الوحدة قليلاً وقيمة h_v كبيرة. الطاقة المستهلكة من قبل المروحة، q_{blower}، kWh،تُعطى بالمعادلة التالية:

$$q_{blower} = \frac{1.6 \times 10^{-10}}{\eta_{blower}} \tau_{op} V \left(21 \frac{G^3}{d} + 82 \frac{G^2}{d^2} \right) \qquad (27.5)$$

حيث: τ_{op} = زمن التشغيل خلال مدة الشحن، hr

η_{blower} = كفاءة المروحة

قيمة q_{blower} يجب ألا تزيد عن نسبة صغيرة من الطاقة الكلية المخزونة. هذه النسبة المسموح بها تتراوح من 1 إلى 10%. وبما أن q_{blower} و η_{blower} تم

اختيارهما، فان طريقة المحاولة والخطأ يمكن أن تستخدم لتعيين قيم G، d. القيم التصميمية لسرعة الكتلة G تتراوح من 0.1 إلى 0.15 $\mathrm{kg/s\,m^2}$ ولقطر الحصو d من 0.02 إلى 0.04 m.

(3) تعيين طول الحشوة L بالمتر والذي تكون درجة حرارة الهواء عنده تساوي درجة حرارة الهواء عند نهاية الشحن. وتبين النتائج العددية أن ذلك الطول يمكن الحصول عليه من المعادلة التالية:

$$L = \frac{B_2}{B_1}\left(\tau_{op} \times 3600\right) \qquad (28.5)$$

حيث B_1, B_2 نحصل عليهما من المعادلتين:

$$B_1 = \frac{h_v}{G c_f} \quad , \quad B_2 = \frac{h_v}{\rho_b \, c_b \, (1-\epsilon)} \qquad (29.5)$$

(4) نعيين مساحة مقطع الحشوة:

$$A = \frac{V}{L} \qquad (30.5)$$

(5) التأكد من النتائج المستخدمة لحل المحاكاة

إجراء تأكيد بواسطة حساب قيمة $\Delta \overline{T}_b$ ومقارنتها بالقيمة المفروضة في المحاولة الأولى.

المراجع

1. Coutier, J. P. and Farber, E. A., *Solar Energy*, **29**, 451 (1982). "Two Applications of a Numerical Approach of Heat Transfer Process within Rock Beds".

2. Dickinson, W. C. And Cheremisinoff, P. N., *Solar Energy Technology Handbook* (1980), Part A: Engineering Fundamentals, Unit 6, section 24 by Turner, R. H., Unit 6, section 23 by Connor, D. W., Marcel, Dekker, Inc., New York.

3. Duffie, J.A., Beckman, W.A., *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Suns Inc., 2nd edition, (1991).

4. Elsayed, M.M, Taha, I.S., Sabbagh, J.A., *Design of Solar Thermal Systems*, Scientific Publishing Center, King Abdulaziz University, Jeddah- Saudi Arabia Kingdom, (1984).

5. Gari, H. N. and Loehrke, R. I., *Trans. ASME., J. Fluids Engrg.*, **104**, 475 (1982). "A Controlled Bouyant Jet For Enhancing Stratification in a Liquid Storage Tank".

6. Hughes, P. J., Klein, S. A. and Close, D. J., *Trans. ASME., J. Heat Transfer*, **98**, 336 (1976). "Packed Bed Thermal Storage Models for Solar Air Heating and Cooling Systems".

7. Karaki, S., Armstrong, P. R. and Bechtel, T. N., Report COO-2868-3 from Colorado State University to the U.S. Department of Energy (1977). "Evaluation of a Residential Solar Air Heating and Nocturnal Cooling System".

8. Kreith, F. Kreider, J.F., *Principles of Solar Engineering*, Hemisphere Publishing Corporation, USA, (1978).

9. Nassar, Y.F, *A Design Procedure of the Domestic Solar Heating Systems on the Base of Air-Heating Flat-Plate Solar Collector*, Ph.D. Theses, Moscow-Russia, (1999).

10. Nassar, Y.F., Salem, A.A., *The Proceedings of the International forum on renewable energies (FIER 2002)*, **389**, May 08-10 (2002), Tetuan, Morocco." The Utilizability Concept of the Thermal Storage in Solar Heating Systems."

11. Nassar, Y.F., Salem, A.A., *The Proceedings of the Symposium on Renewable Energies in Hot Climate Regions*, October 30- 31 (2002), Hoon-Libya." An Optimization Procedure of the Working Fluid Mass Flow Rate through a Flat-Plate Solar Collector in Domestic Solar Heating Systems."

12. Oliveski, R. D. C., Krenzinger, A. And Vielmo, H. A., *Solar Energy*, **75**, 121 (2003). "Comparison between Models for the Simulation of Hot Water Storage Tanks".

13. Phillips, W. F., *Solar Energy*, **26**, 175 (1981). "Effects of Stratification on the Performance of Solar Air Heating Systems".

14. Shah, L. J. and Furbo, S., *Solar Energy*, **75**, 337 (2003). "Entrance Effects in Solar Storage Tanks".

15. Sharma, V.K., Rizzi, G., Funmagalli, S., *the Proceedings of the First Exposition & Symposium for New & Renewable Energy Equipment*, May 4-6, Tripoli-Libya, 68 (1991). "Experimental Evaluation of Solar Collector-Storage Heating System for Space Heating Applications."

16. Thakur, N. S., Saini, J. S. and Solanki, S. C., *Solar Energy*, **74**, 319-329 (2003). "Heat Transfer and Friction Factor Correlations for Packed Bed Solar Air Heater for a Low Porosity System".

17. Zachar, A., Farkas, I. and Szlivka, F., *Solar Energy*, **74**, 287 (2003). "Numerical Analysis of the Impact of Plates for Thermal Stratification Inside a Storage Tank with Upper and Lower Inlet Flows".

الفصل السادس

عمليات تحلية المياه بالطاقة الشمسية

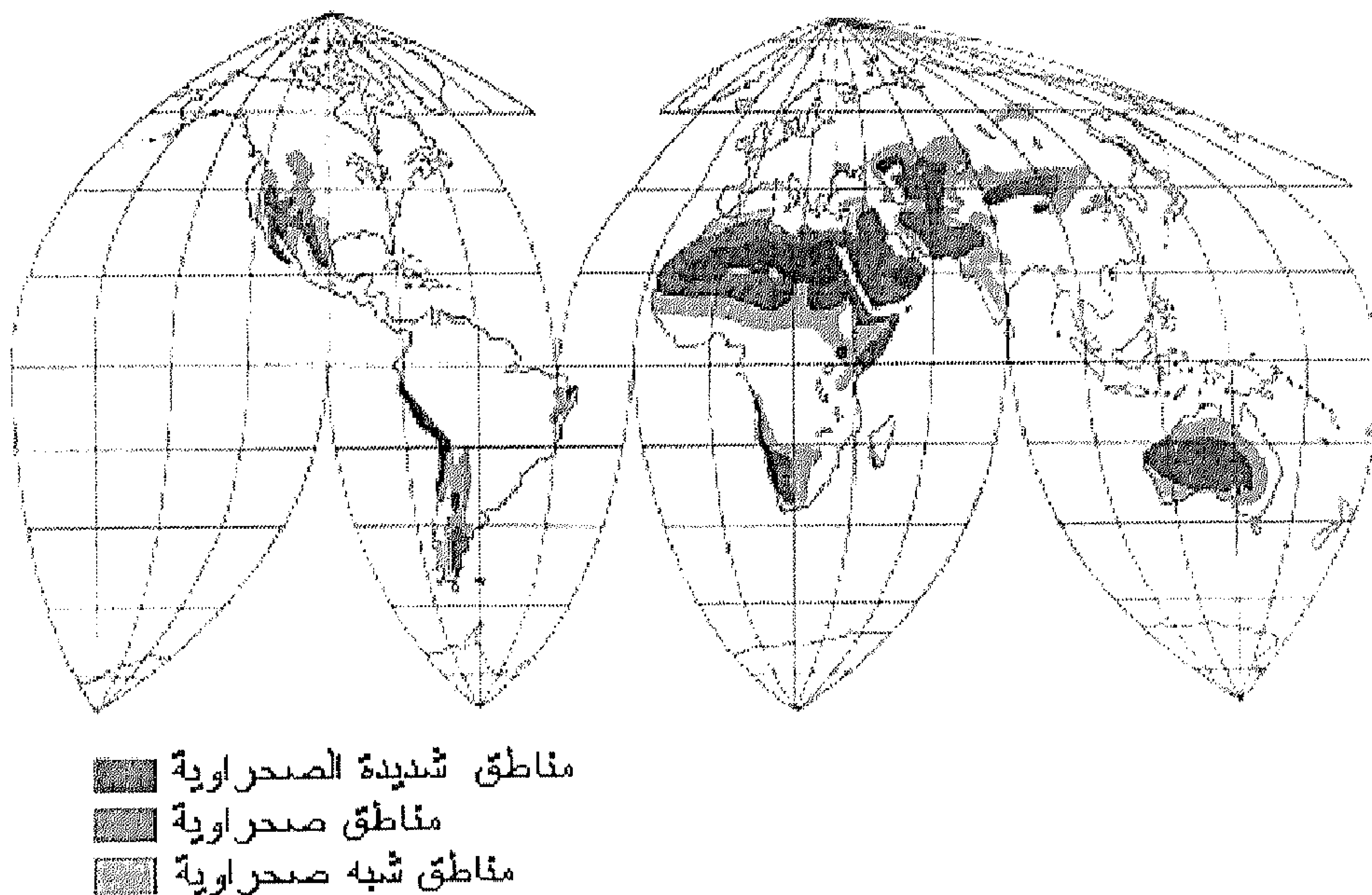
1.6 مقدمة

بالرغم من أن الماء يُغطي ثلثي الكرة الأرضية، إلا أن ما نسبته 97% من الماء، مالح وغير صالح للاستهلاك البشري، والباقي (2.6% تقريباً) فقط مياه عذبة. إلا أن ما نسبته 1% فقط في متناول الإنسان. يُعتقد أنه، حتى هذا الجزء اليسير من الماء العذب يكفي لاستمرارية الحياة والخضرة على سطح الأرض. الطبيعة بحد ذاتها قادرة على تزويد نفسها بالماء العذب اللازم للحياة وذلك من خلال الدورة الهيدرولوجية. بما أن كمية المياه العذبة ثابتة على الأرض والطلب عليها يزداد باستمرار بزيادة السكان والتطور الصناعي السريع، فكان من الضرورة الملحة إيجاد مصادر إضافية للمياه العذبة لسد العجز فيها من المياه المالحة أو العسرة الموجودة على سطح أو في جوف الكرة الأرضية. عملية الحصول على الماء العذب يمكن إنجازها بسهولة وبيسر عن طريق تحلية مياه البحر أو المياه العسرة. تبعاً لتعليمات منظمة الصحة العالمية (WHO)، فإن نسبة الأملاح المذابة المسموح بها في مياه الشرب حوالي 500 جزء لكل مليون جزء ماء (ppm)، وإذا تعدت هذه النسبة *ppm* 1000 يصبح هذا الماء ضاراً بالصحة، ويصنف كماء عسر أو مالح. ويبين الجدول (1) تصنيف المياه بدلالة الأملاح المذابة في مليون جزء ماء.

جدول (1) معدل الأملاح في أنواع مختلفة من المياه

نوع الماء	المحتوى الملحي ppm
ماء البحر	10,000 - 45,000
المياه الجوفية	3,000 - 20,000
الماء العسر	1,000 - 5,000
المياه الملوثة صناعياً	500 - 5,000
مياه الصرف الصحي	500 - 5,000

وتعتبر مياه الأنهار والبحيرات والآبار من أهم مصادر المياه الصالحة للاستهلاك البشري. وبالنظر إلى خريطة العالم المائية، فان حوالي نصف العالم يقع ضمن منطقة الفقر المائي. أما عن الوطن العربي فإنه يُصنف ضمن المناطق الصحراوية النادرة والعديمة المياه، كما هو مبين في الخريطة شكل (1.6).



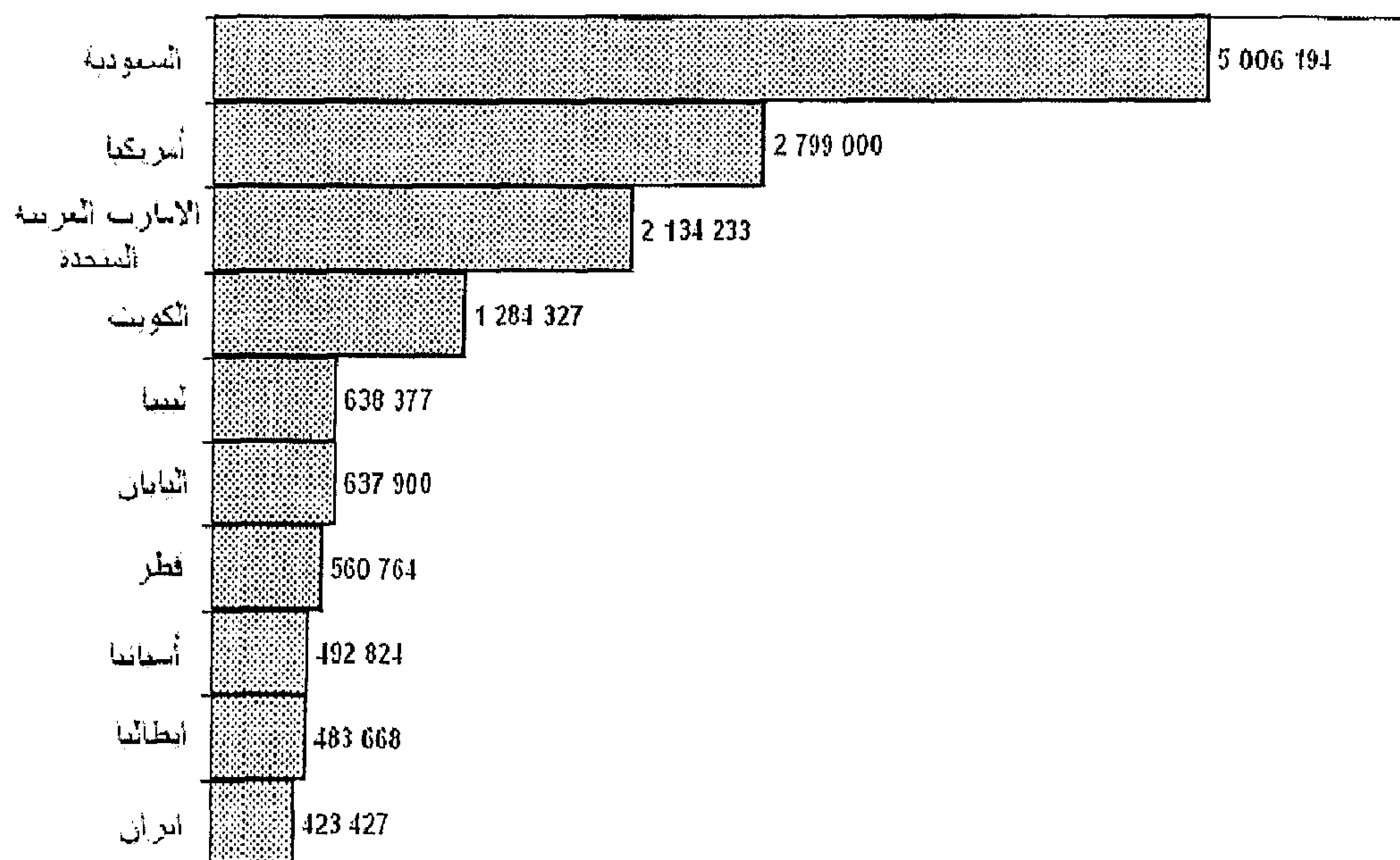
شكل (1.6) تصنيف العالم حسب ندرة المياه

ولهذا فان أزمة المياه هي مشكلة حادة وسوف تتفاقم في المستقبل بسبب الزيادة المفرطة في التعداد السكاني للكرة الأرضية. ولذا تبنت العديد من الدول سياسات واستراتيجيات مختلفة لتوفير المياه العذبة لشعوبها، ومن بين هذه السياسيات بناء السدود لحجز مياه الأمطار والوديان والأنهار وكذلك بناء محطات تحلية مياه البحر. وتشير تقارير الجمعية الدولية للتحلية (IDA) لسنة 2000، إلى وجود أكثر من 13600 محطة تحلية مياه عاملة في أكثر من 120 مكان حول العالم، تنتج حوالي

26 مليون متر مكعب يومياً، يقع أكثر من 60% منها في منطقة الشرق الأوسط. ويمثل الشكل (2.6) العشر دول التي تمتلك أكبر محطات تحلية على مستوى العالم.

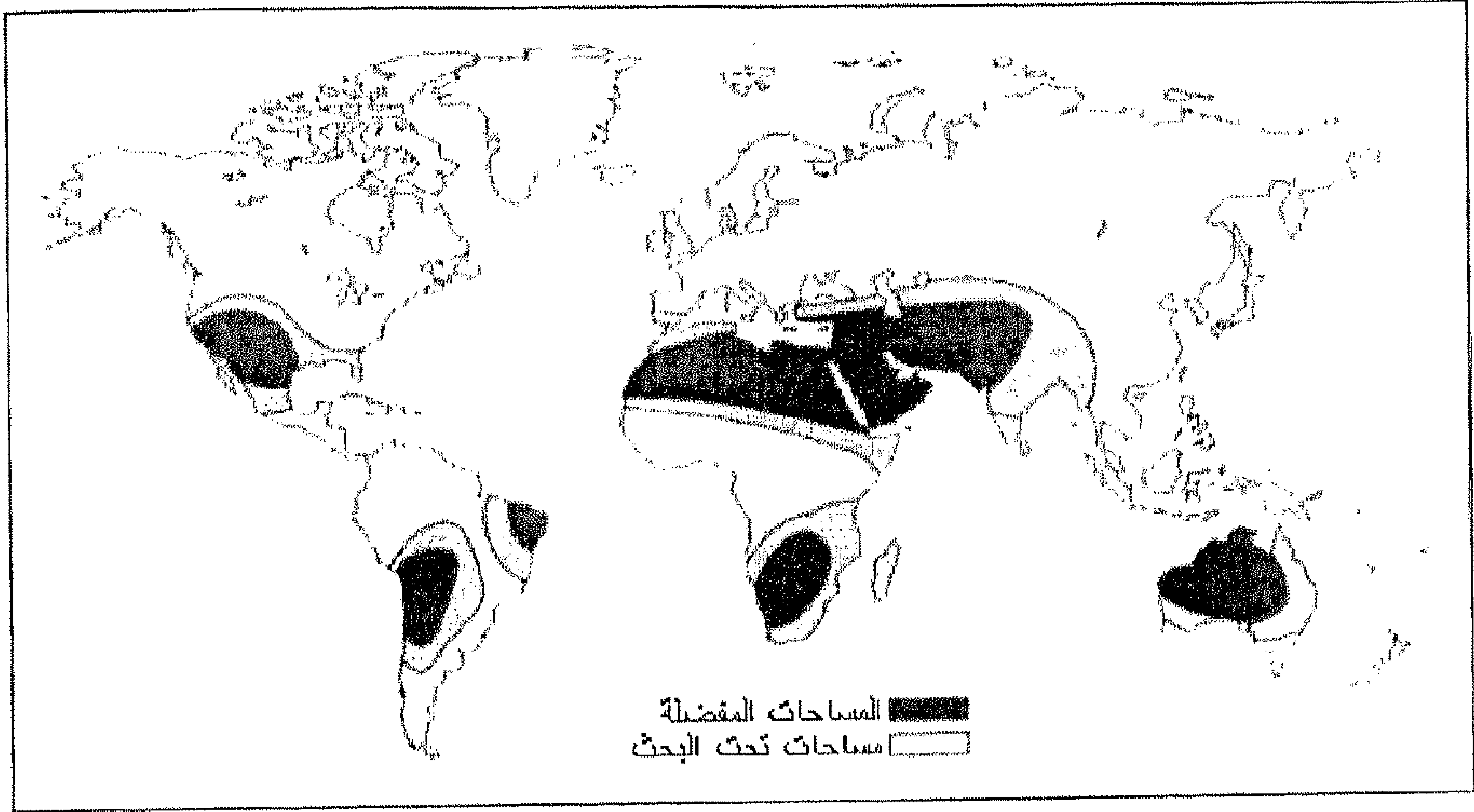
على الرغم مما توفره محطات التحلية التقليدية من حل لمشكلة المياه إلا أن لهذه المحطات ضرر على البيئة من خلال ما تنفثه من غازات ضارة إثر إحراق الوقود الاحفوري في الهواء الجوي.

وتعتبر الطاقات البديلة وفي مقدمتها الطاقة الشمسية الحل البديل لتقليل الاعتماد على الوقود الاحفوري. إلا أن استخدام الطاقة الشمسية في تطبيقات تحلية المياه لا يتجاوز 1% من محطات تحلية المياه التقليدية. وهذا بسبب كلفة رأس المال والصيانة العالية لمحطات الطاقة الشمسية، مما يجعل هذا المصدر غير منافس اقتصادياً لمحطات التحلية التقليدية. وأقتصر استخدام الطاقة الشمسية على المناطق النائية والبعيدة عن شبكة الكهرباء والماء العامة.



شكل (2.6) القدرات الإنتاجية لأكبر عشر منشآت تحلية مياه البحر في العالم، (m^3/day)

الجدير بالاهتمام والذكر أن المناطق التي صنفت سلفاً في الشكل (1.6) على أنها مناطق صحراوية، تعتبر هذه المناطق نفسها من المناطق المفضلة للتطبيقات الحرارية الشمسية، كما هو مبين في الشكل (3.6)، والمعلوم أن تحلية المياه أحدى أهم التطبيقات الحرارية.

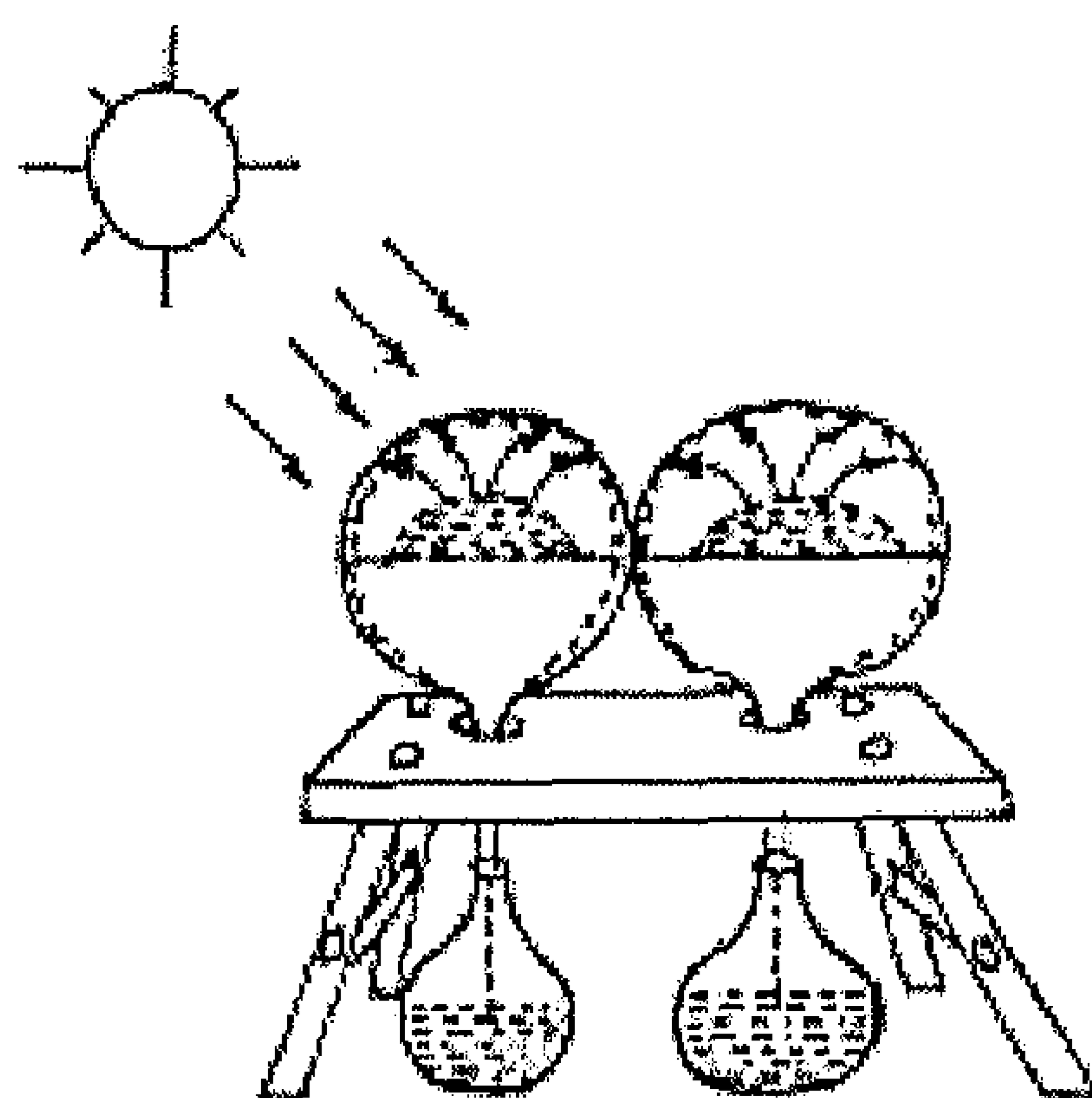


شكل (3.6) تصنيف العالم حسب مناطق مفضلة للتطبيقات الحرارية الشمسية

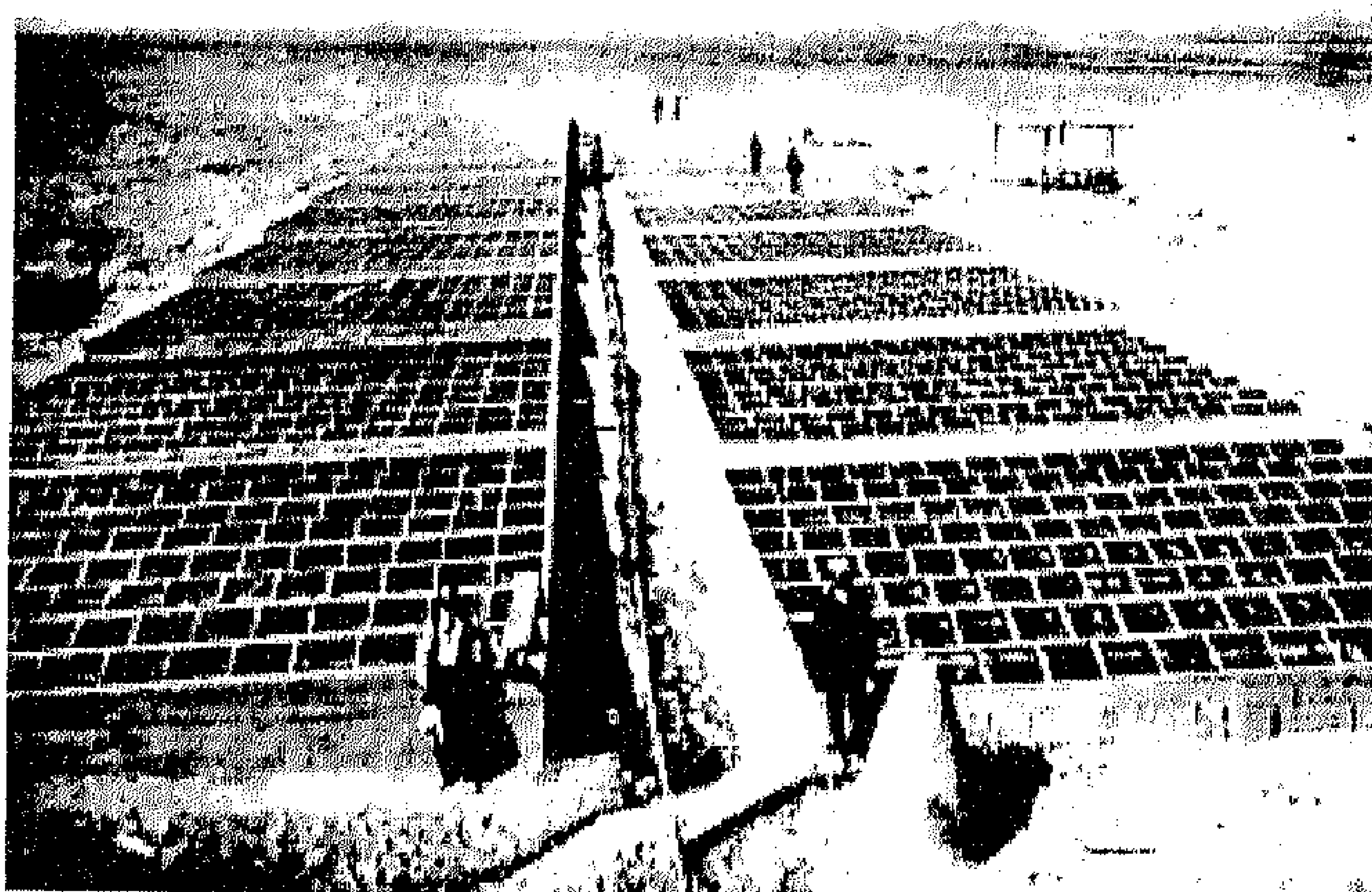
يعتبر استخدام الطاقة الشمسية في تحلية المياه من أقدم التقنيات. حيث قام Della Porta في عام 1589، باستخدام قدور، كما هو موضح في الشكل (4.6)، تعرض هذه القدور إلى الأشعة الشمسية الحارة ليتبخر الماء ويجمع المتكثف في أوعية موضوعة في الأسفل مباشرة، (Nebbia, et al., 1966).

بعدها بمئات السنين وفي عام 1872، قام المهندس السويدي Carlos Wilson، بتصميم وإنشاء أول محطة تحلية مياه شمسية كبير في تشيلي بمدينة Las Salinas. أنشأت المحطة لتزويد عائلات عمال منجم الملح الصخري ومنجم الفضة المجاور،

بالماء العذب وتم استخدام ماء المنجم الشديد الملوحة (حوالي 140g/kg أو 140,000 ppm) كمصدر ماء لتغذية المحطة، وبنيت المحطة على أرض بمساحة $7896 m^2$ ووصلت إنتاجيتها حوالي $22.70 m^3$ من الماء العذب يومياً (شكل 5.6). وعملت المحطة حوالي 40 سنة حتى نضوب المنجم.



شكل (4.6) جهاز تقطير شمسي تاريخي



شكل (5.6) أول محطة تحلية مياه شمسية في العالم في تشيلي عام 1883

وتوالت بعد ذلك المحاولات لتطوير هذه المقطرات، وإلى يومنا هذا مازالت الجهود تبذل في سبيل الوصول إلى أعلى كفاءة وأكبر إنتاجية وتقليل تكلفة الماء المنتج من وحدات التقطير الشمسي. وكنتيجة لتلك الجهود ظهر العديد من التصاميم

المختلفة، والتي ظل أكثرها مجرد رسوماً على الورق وغير مطبقة عملياً. للمزيد من المعلومات أنظر (المنتصر وأخرون، 2000)، (Nassar, et al., 2002)، (Garg, 1991).

2.6 تصنيف محطات تحلية المياه

تُصنف محطات تحلية المياه إلى صنفين أثنين وهما محطات التحلية التقليدية ومحطات التحلية الشمسية.

1.2.6 محطات التحلية التقليدية

من السهولة والملائم أيضاً تصنيف تقنيات تحلية المياه إلى فئتين، كما هو مبين في الجدول (2.6)، كما أوردها (Spiegler, 1969). في الحالات التي تكون فيها نسبة الأملاح أقل من 3.5%، فان الفئة B تظهر تقدماً على الفئة A. وفي أنظمة تحلية المياه لا يوجد ميزات مطلقة لأي تقنية على الأخرى، والاختيار يجب أن يتم على أساس علمي واقتصادي.

جدول (2.6) تقنيات تحلية المياه

الفئة			التقنية	الرمز	Technique
A	العمليات التي تفصل الماء من المحلول				
	1.	تحلية أو تبخير			
		أ	متعدد - تأثير أنابيب طويلة رأسية	(MED)	MultiEffect Distillation
		ب	متعدد المراحل الوميضي	(MSF)	MultiStage Flash
		جـ	البخار المضغوط	(VC)	Vapour Compresion
		د	الترطيب (الطاقة الشمسية)	(SD)	Humidification (solar)
	2.	التبلور أو التجميد			Freezing Crystallization
		أ	التجميد المباشر	(DF)	Direct Freezing
		ب	التجميد الغير مباشر	(IF)	Indirect Freezing
		جـ	الهيدرة	(HD)	Hydrates
	3.	التناضح العكسي		(RO)	Reverse Osmosis
	4.	استخلاص المذيب		(SE)	Solvent Extraction

Technique	الرمز	التقنية		الفئة
العمليات التي تفصل الملح عن المحلول				B
ElectroDialysis	(ED)	الفرز الغشائي الكهربائي (الديلزة)	.1	
Osmionisis	(OP)	الضغط الاسموزي	.2	
Adsorption	(AD)	الامتزازية	.3	
Liquid Extraction	(LE)	استخلاص السائل	.4	
Ion Exchange	(IE)	تبادل الأيونات	.5	
Controlled Diffusion	(CD)	الاندماج تحت السيطرة	.6	
Biological Systems	(BS)	أنظمة بيولوجية	.7	

2.2.6 محطات تحلية المياه الشمسية

يمكن تصنيف أنظمة تحلية المياه التي تستخدم الطاقة الشمسية إلى ثلاثة أصناف، حسب مصدر الطاقة التي تعمل بها المحطة:

1. مصدر حراري شمسي (مجمعات شمسية مستوية، مركزة، برك شمسية)
2. مصدر كهربائي شمسي (الخلايا الشمسية)
3. مصدر كهروحراري شمسي (محطات مشتركة حرارية وكهربائية)

إن اختيار التطبيق المناسب للطاقة الشمسية لتزويد الطاقة لمحطة التحلية تعتمد على عدة عوامل، تتضمن هذه العوامل: حجم المحطة، ملوحة مصدر المياه، بُعدها عن شبكة الكهرباء، البنية التحتية التقنية، وتوفر الطاقة الشمسية في الموقع.

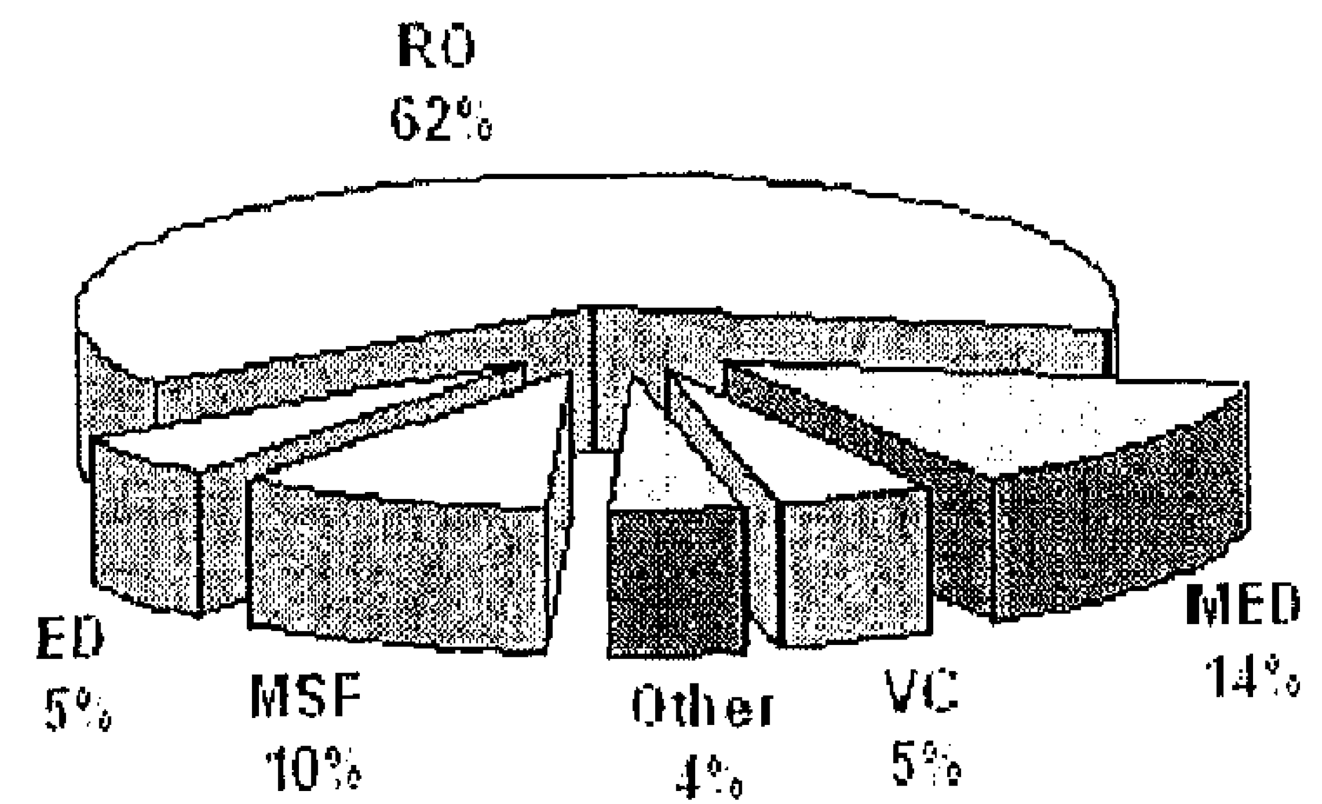
وتعتبر المحطات (MSF)، (MED)، (VC)، (RO)، (ED)، من أكثر التقنيات شيوعاً وأكثر التطبيقات استخداماً للطاقة الشمسية كمصدر أساسي للطاقة لتدوير المحطة. الجدول (3.6) يبين تصنيف لاستخدام الطاقة الشمسية كمصدر للطاقة لتقنيات التحلية المتعددة وكذلك نوعية المياه المالحة، (Desalination Guide Using Renewable Energies, 1998)

جدول (3.6) تقنيات تحلية المياه باستخدام الطاقة الشمسية

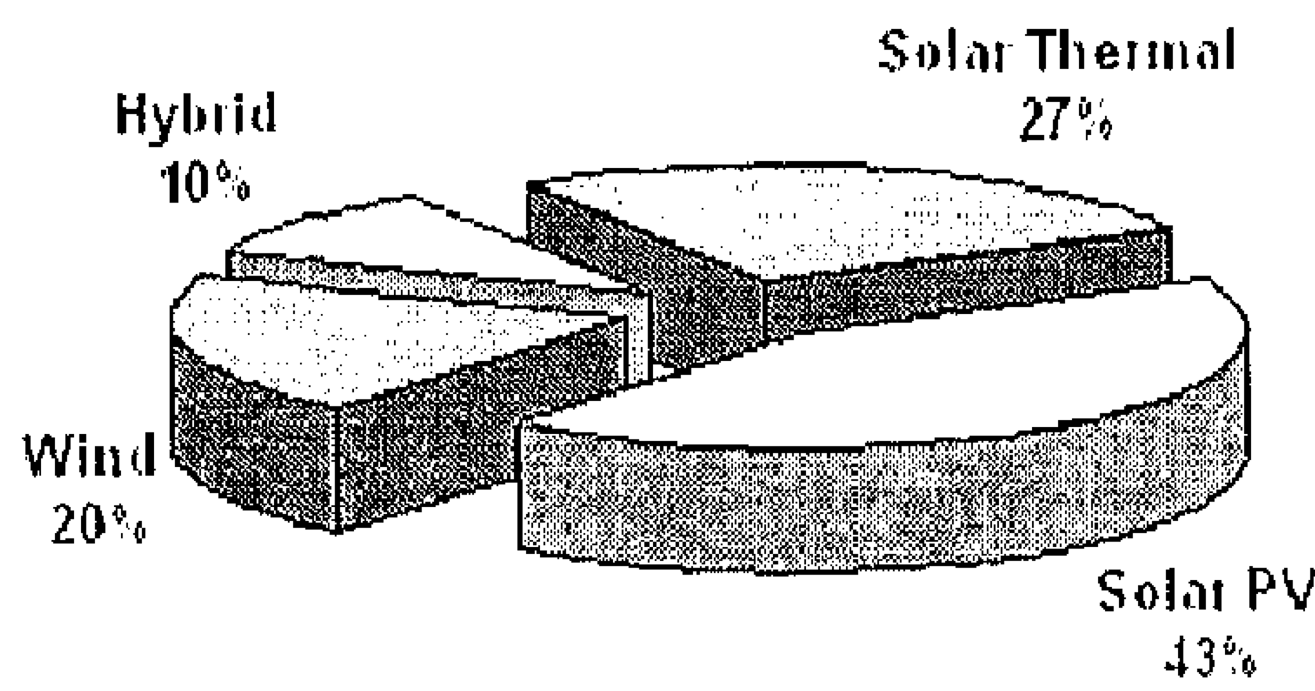
تقنية التحلية	نوع ماء التغذية	الطاقة الشمسية
(MED)	ماء البحر	الطاقة الشمسية الحرارية
(MSF)	ماء البحر	
(RO)	ماء البحر	الخلايا الشمسية
(RO)	ماء عسر	
(ED)	ماء عسر	
(RO)	ماء البحر	طاقة الرياح
(RO)	ماء عسر	
(VC)	ماء البحر	
(MED)	ماء البحر	طاقة جوف الأرض

ويمثل الشكلان (6.6)، (7.6) نسب تقنيات التحلية المستخدمة للطاقة الشمسية والمصادر البديلة الأخرى للطاقة المتجددة ونسبة مشاركة كل مصدر من مصادر الطاقة المتجددة في تقنيات التحلية، على التوالي، (Tzen, Morris, 2003).

وبما أن هذا الفصل يتناول دراسة التطبيقات الحرارية للطاقة الشمسية في تحلية المياه، فلابد من سرد محطات تحلية المياه العاملة في العالم على الطاقة الشمسية الحرارية وسعة إنتاجيتها. ويبين الجدول (4.6) أهم المحطات الشمسية لتحلية المياه حول العالم (Nassar, Salem, 2002).



شكل (6.6) عمليات التحلية المستخدمة للطاقات البديلة

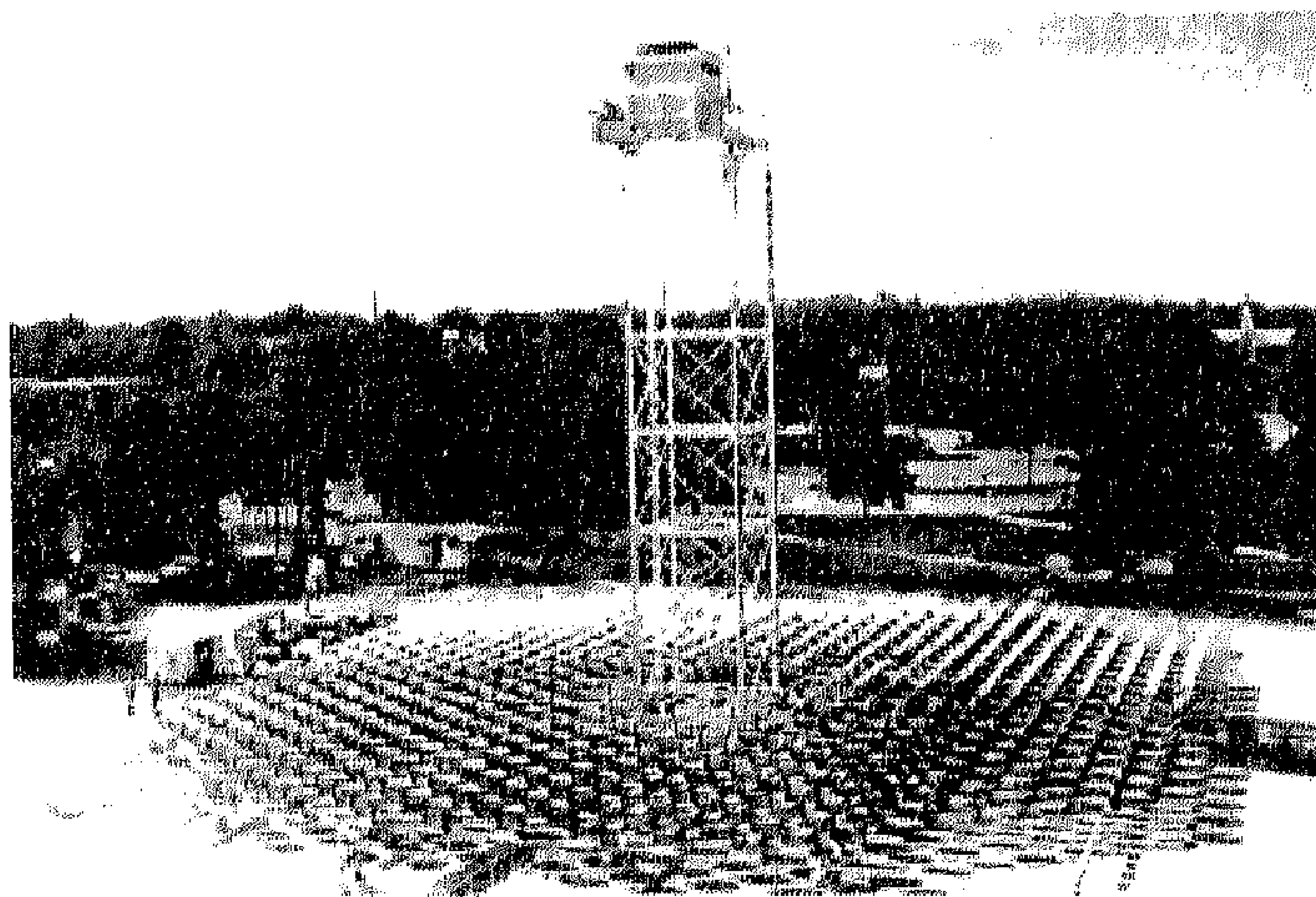


شكل (7.6) مصادر الطاقة بتقنيات التحلية

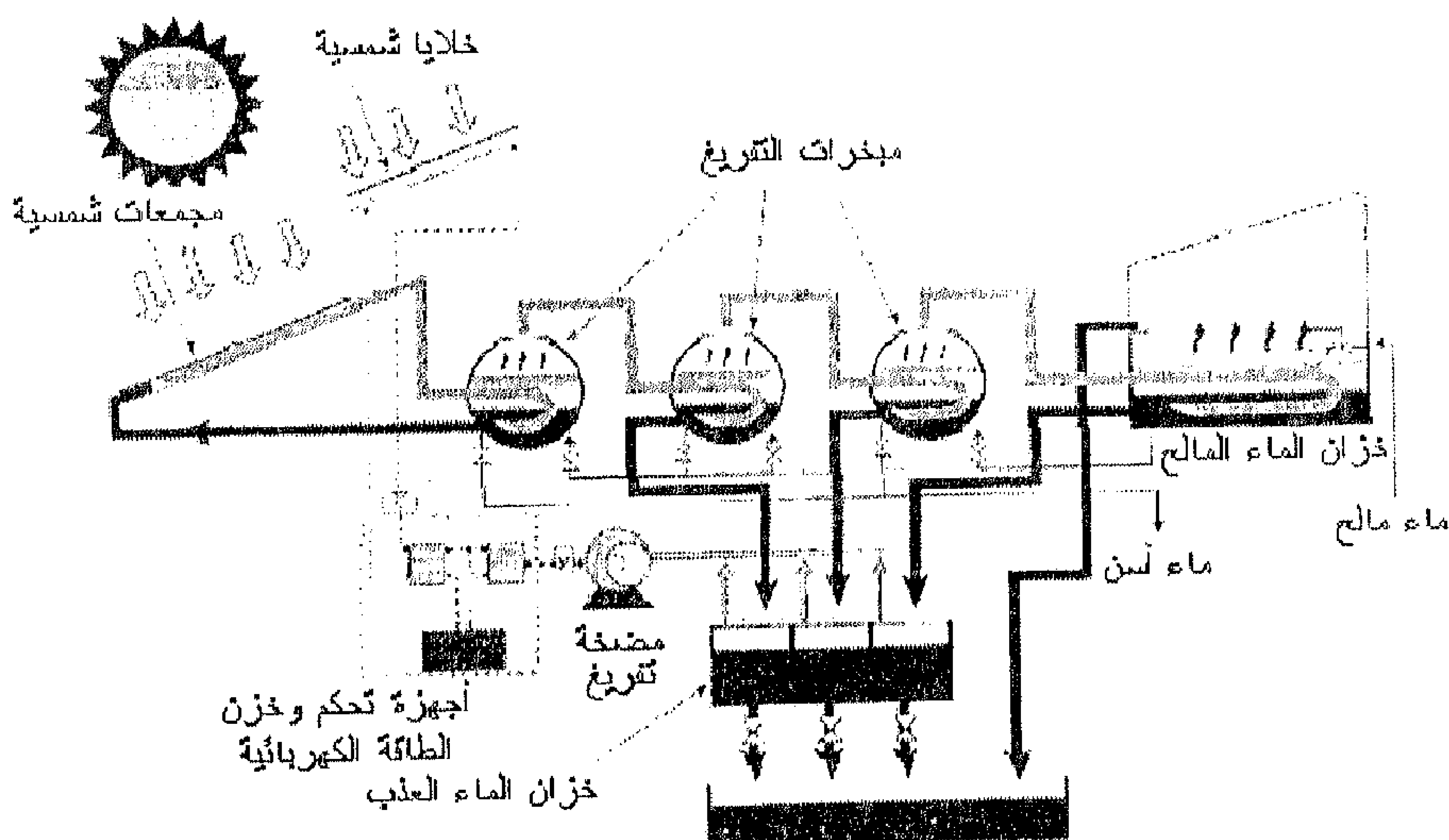
جدول (4.6) محطات تحلية المياه المعتمدة على الطاقة الشمسية الحرارية كمصدر للطاقة

الدولة	المصدر الحراري	نوع المحطة	الإنتاجية m^3 / day	المصدر
ايطاليا	بركة شمسية	MSF	55	Delyannis, 1987
	بركة شمسية	MED	30	Caruso, et al., 1999
	مجمعات تركيز قطع مكافئ	MSF	0.3	Palma, 1991
أطلانطا	بركة شمسية	MSF	300	Szagvay, et al., 1999
تونس	بركة شمسية	MSF	0.2064	Safi, 1998
	مجمعات شمسية		0.35	European Committee, 1998
ليبيا	بركة شمسية	MSF	5	Agha, 1999
تاكسس	بركة شمسية	MSF	19	Luetal,2000
فلسطين	بركة شمسية	MED	3000	European Committee, 1998
	المجمعات والخلايا الشمسية	4-MSF مراحل	0.2	Abu-Jubal, 2001
الإمارات المتحدة	مجمعات أنبوبية مفرغة	18-MED مرحلة	120	El-Nashar, 1985, 1993
	مجمعات تركيز قطع مكافئ	55-MED 75-MSF مرحلة	500	Hanafi, 1991
	مجمعات تركيز قطع مكافئ	MED	6000	Delyannis, 1987
أسبانيا	مجمعات تركيز قطع مكافئ	14-MED مرحلة	72	Zarza, 1991
الكويت	مجمعات تركيز قطع مكافئ	MSF	100	Delyannis, 1987
فرنسا	مجمعات أنبوبية مفرغة	14-ME مرحلة	40	Madani, 1990
المكسيك	مجمعات تركيز قطع مكافئ	10-MSF مراحل	10	Manjares, et al., 1979
اليابان	مجمعات شمسية مستوية	10 -ME مراحل	16	Delyannis, 1987

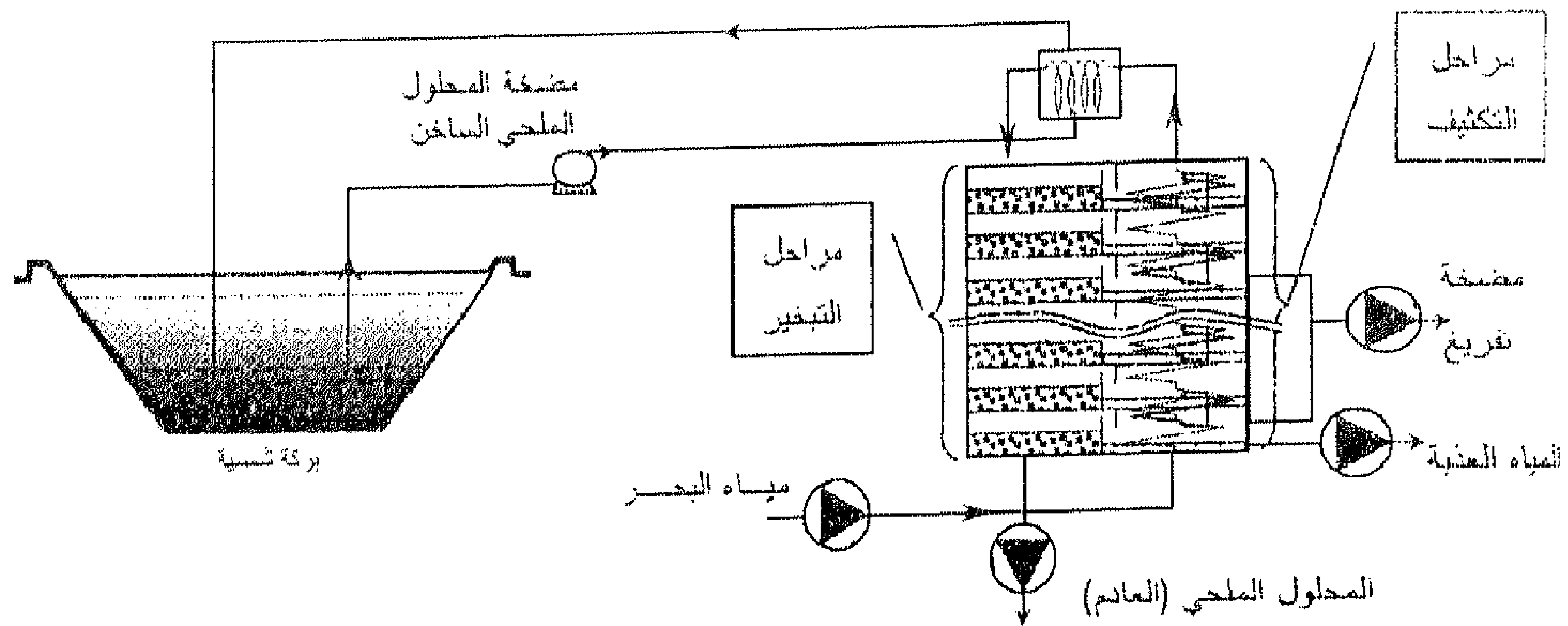
وتمثل الأشكال (8.6، 9.6، 10.6) صور ورسوم تخطيطية لمحطات تحلية شمسية في الوطن العربي.



شكل (8.6) محطة MED في أبوظبي، أنشأت في عام 1984، وتعمل بمجمعات الأنابيب المفرغة، ومازالت في الخدمة حتى الآن، (Delyannis, 2003)



شكل (9.6) مخطط محطة تحلية المياه في غزة – فلسطين، (Abu-Gabel, et al., 2001)



شكل (10.6) مخطط محطة تحلية المياه في طرابلس – ليبيا، (أغا وأخرون، 1999)

يتناول هذا الفصل التحليل الحراري لمقطرات شمسية من النوع السطحي (Roof-type Still). تنتمي هذه المقطرات إلى عائلة المقطرات الشمسية التقليدية الحرارية المباشرة. المقطر السطحي (يسمى أيضاً الحوضي Basin-type) بسيط التركيب وسهل التصنيع وهو من أقدم الأنواع، كما ذكر سابقاً.

نبداء هذا الموضوع بسرد بعض التعريفات ذات الأهمية والعلاقة المباشرة في تحليل أي مقطر شمسي.

3.6 تعريفات

1.3.6 إنتاجية المقطر الشمسي

الإنتاجية اليومية للمقطر الشمسي، وتسمى أيضاً بالمحصول اليومي، P_d، تعرف بأنها الحجم الكلي للماء المحلى، باللتر، المنتج بواسطة المقطر في اليوم على وحدة مساحة تجميع الأشعة الشمسية. أما الناتج السنوي، Y_p، فهو حجم الماء المُحلى، بالمتر المكعب، المنتج بواسطة المقطر في السنة على وحدة مساحة تجميع الأشعة الشمسية.

2.3.6 كفاءة التشغيل للمقطر الشمسي

يحكم على أداء المقطر الشمسي خلال فترة زمنية معينة، τ، بواسطة كفاءة تشغيله، η، والتي تعرف كالتالي:

$$\eta = \frac{P_\tau \left(l/\mathrm{m}^2\right) \times 2.430\,(\mathrm{MJ}/l) \times 100}{H_{t\tau}\left(\mathrm{MJ}/\mathrm{m}^2\right)} \qquad (1.6)$$

حيث: P_τ = إنتاجية الماء العذب خلال الفترة الزمنية

$H_{t\tau}$ = الاشعاع الشمسي الكلي خلال الفترة الزمنية τ

2.430 = يمثل متوسط قيمة الحرارة الكامنة لتبخير لتر من الماء، (MJ/l).

وبالتالي فان الكفاءة اليومية للتشغيل، η_d، تعرف كالتالي:

$$\eta_d = \frac{P_d \left(\mathrm{l}/\mathrm{m}^2.\mathrm{day}\right) \times 2.430\,(\mathrm{MJ}/l) \times 100}{H_{td}\left(\mathrm{MJ}/\mathrm{m}^2.\mathrm{day}\right)} \qquad (2.6)$$

حيث: P_d = إنتاجية الماء العذب خلال اليوم

H_{td} = الاشعاع الشمسي الكلي اليومي

والكفاءة السنوية، ، تصبح:

$$\eta_y = \frac{P_y \left(\mathrm{m}^3/\mathrm{m}^2\ .\mathrm{year}\right) \times 2.430 \times 10^3 \left(\mathrm{MJ}/\mathrm{m}^3\right) \times 100}{H_{ty}\left(\mathrm{MJ}/\mathrm{m}^2.\mathrm{year}\right)} \qquad (3.6)$$

الجدير بالذكر أن كفاءة المقطرات الشمسية السطحية النوع صغيرة ولا تتعدى 35%.

3.3.6 نسبة الأداء

تعرف نسبة الأداء، (PR)، على أنها النسبة بين الحرارة الكامنة لتبخير 1 كيلوجرام من الماء إلى الطاقة اللازمة لتقطير 1 كيلوجرام من الماء العذب (Elsayed, et al., 1984).

ويبين جدول (5.6) مقارنة لنسب الأداء والطاقة المستهلكة لإنتاج 1 كيلوجرام من الماء العذب لعدد من تقنيات تحلية المياه الشائعة الاستخدام، (Kreith, et al., 1981).

جدول (5.6) متطلبات الطاقة و نسبة الأداء لتحلية الماء العسر*

التقنية المستخدمة	PR	kJ/kg
التناضح العكسي	7	30
الديلزة	46	50
التجميد بالتفريغ	37	63
التجميد بالتفريغ/ ضغط البخار	25	102
متعدد التأثير، متعدد المراحل	19	125
متعدد المراحل الوميضي/ أنابيب رأسية	13	175
ضغط البخار	12	186
التبخير بانابيب رأسية	11	204
متعدد المراحل الوميضي	9	251
مقطر شمسي سطحي أحادي التأثير	0.53	4350

* ملوحة ماء التغذية 3,500 mg/liter، ملوحة الماء المنتج 500 mg/liter، كفاءة التحويل الحراري الكهربائي 25%.

4.6 المقطر الشمسي السطحي أحادي التأثير (الحوضي)

1.4.6 التركيب

التركيب الأساس للمقطر الشمسي السطحي بسيط، ويتضمن غطاءاً شفافاً، حوض التقطير، قاعدة الحوض المصنوعة من أو المطلية بمادة سوداء لزيادة امتصاصية الطاقة الشمسية، مجرى لاستخلاص الماء العذب، وكذلك مخرجاً لتصريف الماء الآسن من المقطر. إن تصاميم مختلفة من المقطرات السطحية النوع صُنعت في العالم

لأغراض تجارية. ويوضح الشكل (11.6) رسم تخطيطي لسبعة أنواع رئيسية منها كما أوردها (Delyannis, et at., 1973). وعادة ما تستخدم المقطرات غطاءاً واحداً أو غطاءاً مزدوجاً، وتكون الأغطية الشفافة من الزجاج أو اللدائن.

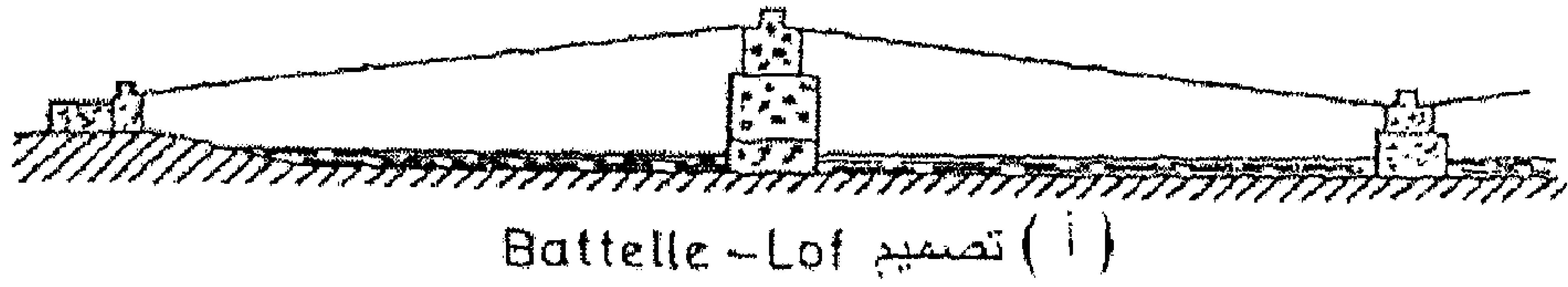
والجدول (6.6) يبين على أكبر محطات التقطير المسطحة في العالم ويحتوي على بعض المعلومات التصميمية والإنتاجية الهامة (Garg, 1991).

جدول (6.6) بعض محطات التقطير الشمسي المسطحة

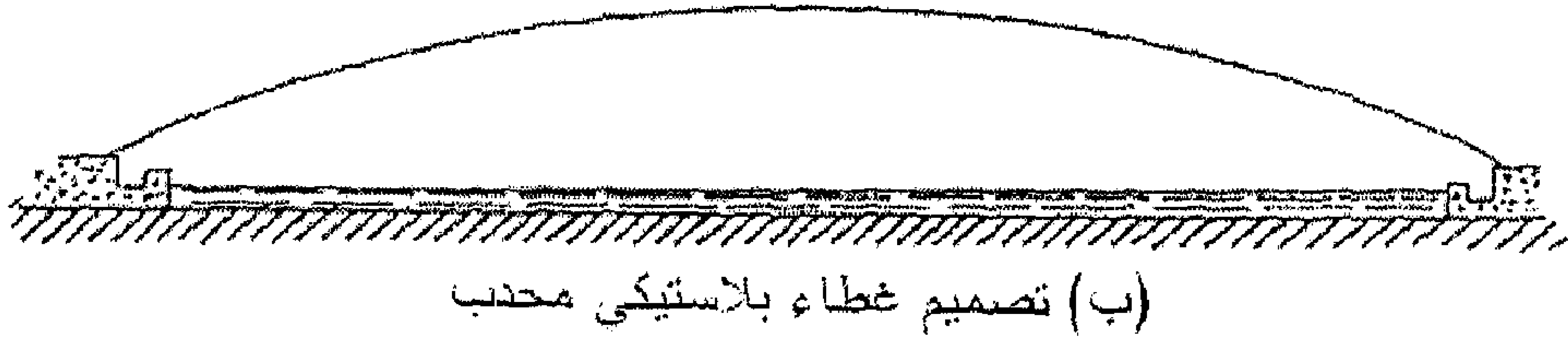
البلد	الموقع	التصميم*	السنة	m^2	الإنتاجية (lpd)	ماء التغذية	الغطاء	ملاحظات
استراليا	Muresk I	(هـ)	1963	372	832	ماء عسر	زجاج	صيانة
	Muresk II		1966	372	832	ماء عسر	زجاج	تعمل
	Coober Pedy		1966	3160	6359	ماء عسر	زجاج	تعمل
	Caiguna		1966	372	776	ماء عسر	زجاج	تعمل
	Hamelin Pool		1966	557	1211	ماء عسر	زجاج	تعمل
	Griffith		1967	413	908	ماء عسر	زجاج	تعمل
	Santa Maria		1965	743	2120	ماء البحر	بلاستيك	مهجورة
تشيلي	Las Salinas	(هـ)	1872	4460	14762	ماء عسر	زجاج	مهجورة
	Quillagua		1968	100	401	ماء البحر	زجاج	تعمل
اليونان	Symi I	(د)	1964	2686	7570	ماء البحر	بلاستيك	صيانة
	Symi II	(د)	1968	2600	-	ماء البحر	بلاستيك	مفككة
	Aegina I	(جـ)	1965	1490	4329	ماء البحر	بلاستيك	صيانة
	Aegina II	(د)	1968	1486	-	ماء البحر	بلاستيك	مهجورة
	Salamis	(جـ)	1965	388	1098	ماء البحر	بلاستيك	مهجورة
	Patmos	(و)	1967	8600	26116	ماء البحر	زجاج	تعمل
	Kilmolos		1968	2508	7570	ماء البحر	زجاج	تعمل
	Nisyros		1969	2005	6056	ماء البحر	زجاج	تعمل
	Fiskardo		1971	2200	-	ماء البحر	زجاج	تعمل
	Kionion		1971	2400	-	ماء البحر	زجاج	تعمل
	Megisti		1973	2528	-	ماء البحر	زجاج	تعمل

البلد	الموقع	التصميم*	السنة	m^2	الإنتاجية (lpd)	ماء التغذية	الغطاء	ملاحظات
المكسيك	Natividad Isl.	(د)	1969	95	379	ماء البحر	زجاج	تعمل
الباكستان	Gwadar I	(و)	1969	306	–	ماء البحر	زجاج	تعمل
	Gwadar II	(ز)	1972	9072	–	ماء البحر	زجاج	تعمل
أسبانيا	Las Marinas	(أ)	1966	868	2574	ماء البحر	زجاج	تعمل
تونس	Chakmou	(د)	1967	440	530	ماء عسر	زجاج	تعمل
	Mahdia		1968	1300	4163	ماء عسر	زجاج	تعمل
أمريكيا	Daytona Beacl	(أ)	1959	228	605	ماء البحر	زجاج	صيانة
	Daytona Beacl		1961	246	530	ماء البحر	زجاج	مفككة
	Daytona Beacl	(ب)	1961	216	568	ماء البحر	بلاستيك	مفككة
	Daytona Beacl		1963	148	1628	ماء البحر	بلاستيك	مفككة
الاتحاد السوفيتي	Bakharden	(هـ)	1969	600	1628	ماء عسر	زجاج	تعمل
الهند	Potit st.Vincen	(ب)	1967	1710	4921	ماء البحر	بلاستيك	تعمل
	Haiti	(د)	1969	223	757	ماء البحر	زجاج	تعمل
	Bitra	(جـ)	1980	–	2000	ماء عسر	زجاج	تعمل
	Kulmis		1980	–	3000	ماء عسر	زجاج	تعمل
	Bhavnagar	(هـ)	1965	377	908	ماء البحر	زجاج	تعمل
	Awania		1978	1866	–	ماء عسر	زجاج	تعمل
الصين	Wuzhi	(جـ)	1976	385	–	ماء البحر	زجاج	تعمل
	Zhungjian		1979	50	–	ماء البحر	زجاج	تعمل
كولومبيا	Punta Canoa		1982	400	1500	–	–	تعمل

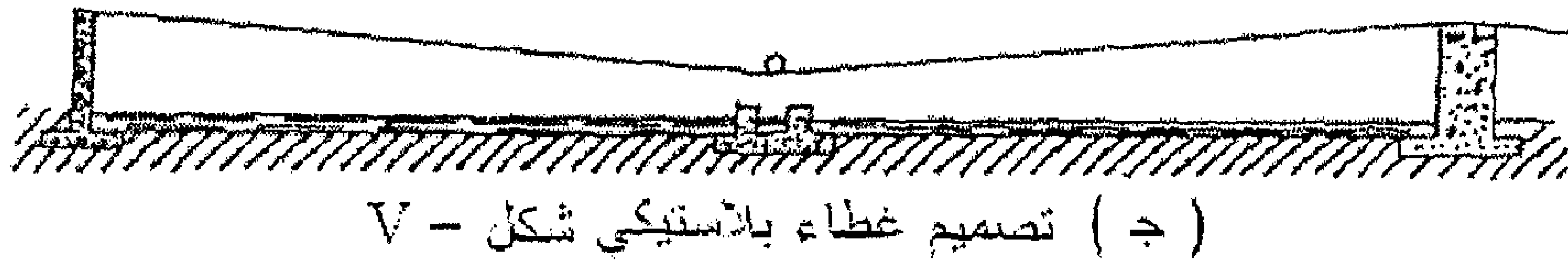
* الرموز مطابقة للشكل (11.6)



(أ) تصميم Battelle -Lof



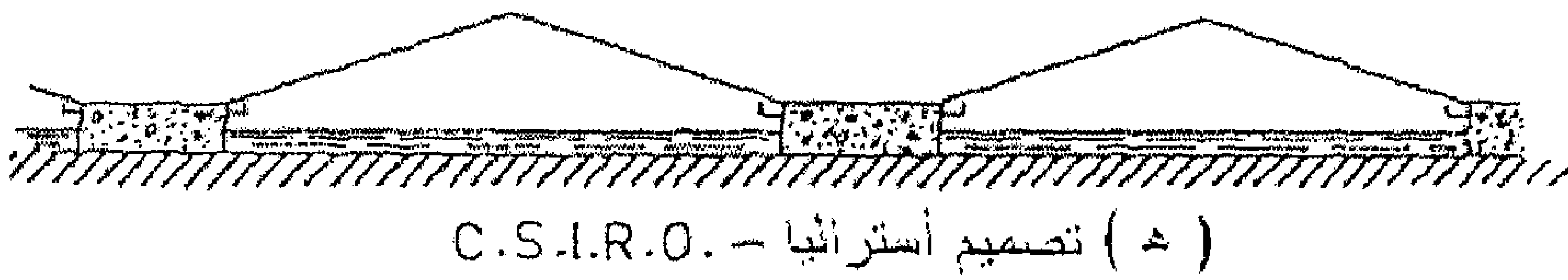
(ب) تصميم غطاء بلاستيكي محدب



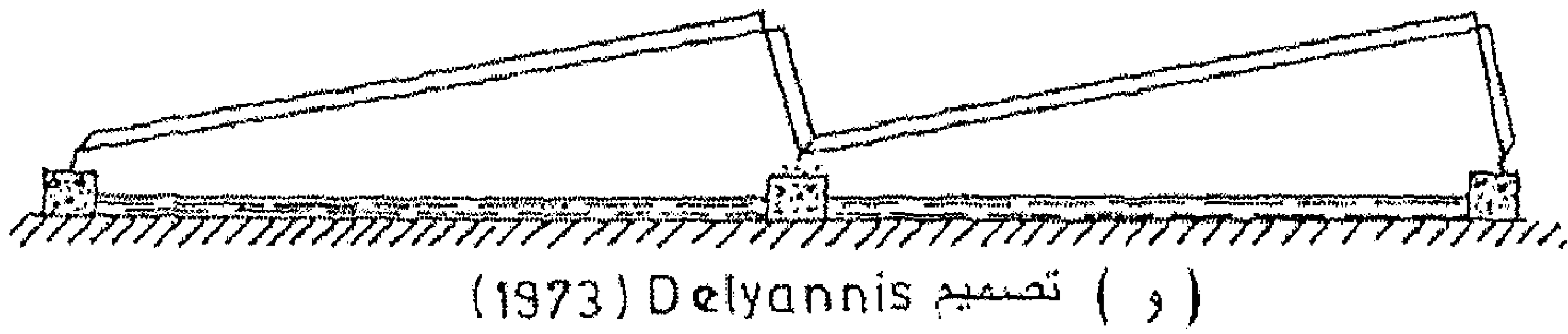
(جـ) تصميم غطاء بلاستيكي شكل - V



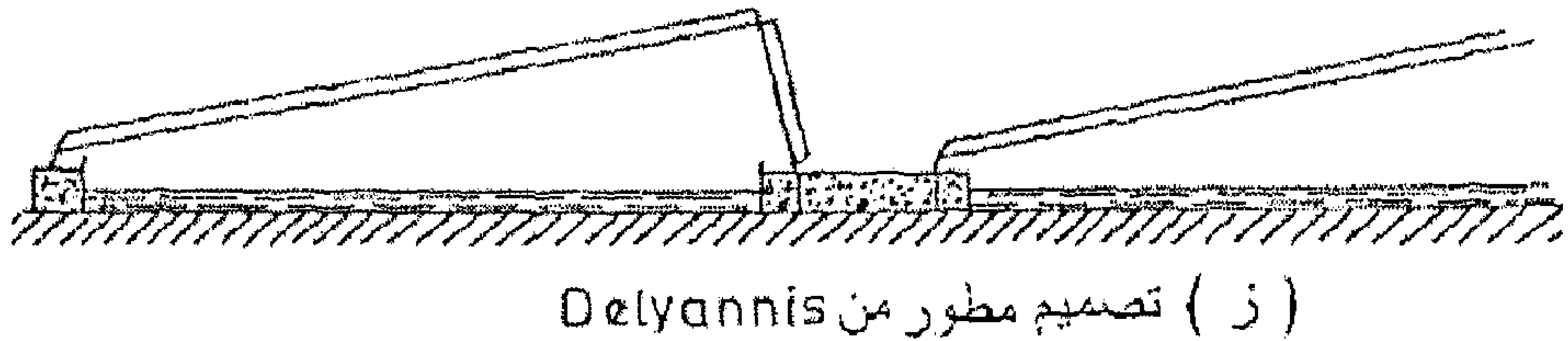
(د) تصميم غطاء بلاستيكي ممدود أو غطاء زجاجي مائل



(هـ) تصميم أستراليا - .C.S.I.R.O



(و) تصميم Delyannis (1973)



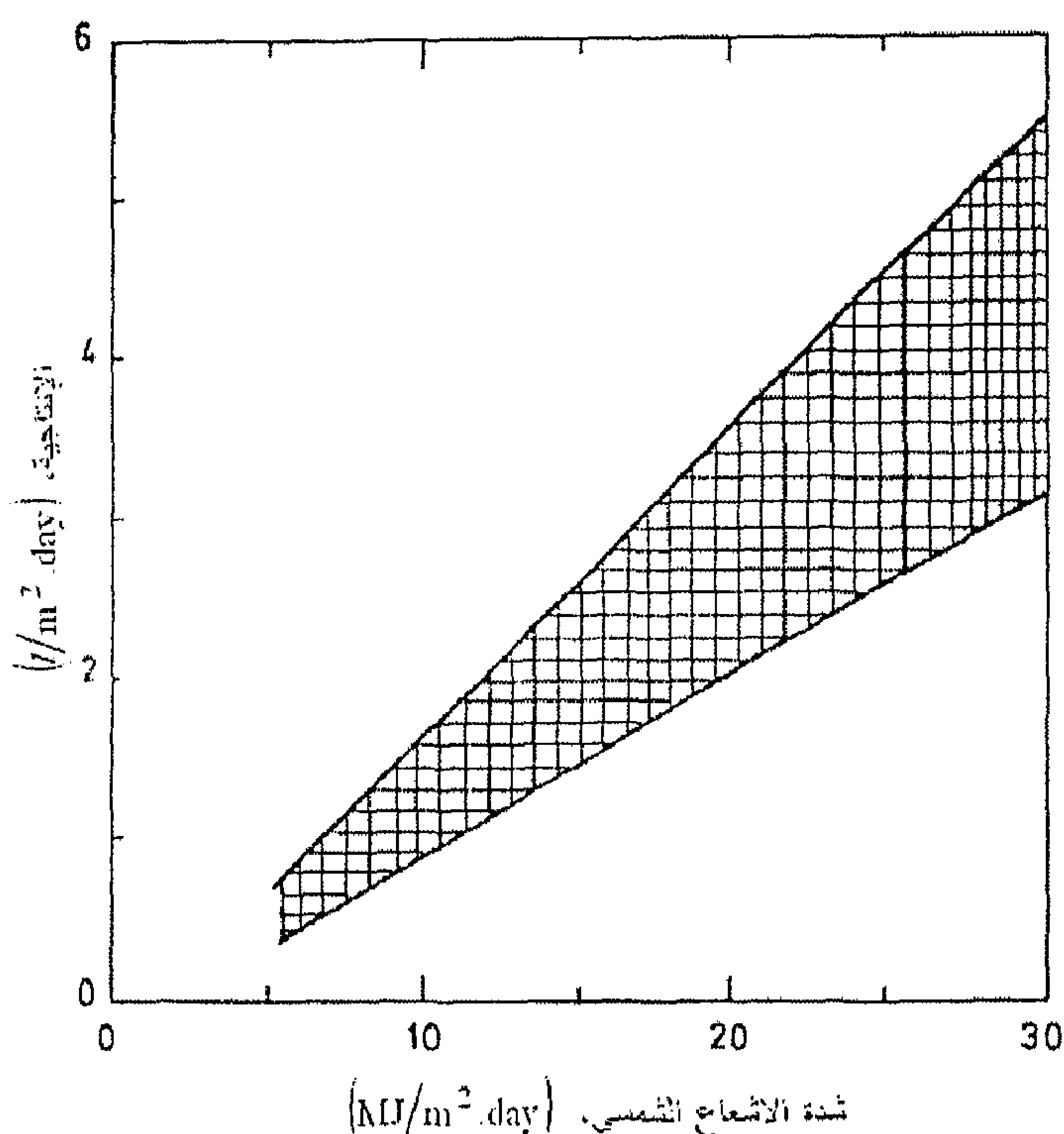
(ز) تصميم مطور من Delyannis

شكل (11.6) مخطط لمقاطع بعض المقطرات الشمسية السطحية

وقد تم الحصول على متوسط إنتاجية، P_d ، أكبر 11 محطة تقطير شمسي وتمثيلها في الشكل (12.6) كدالة في متوسط شدة الإشعاع اليومي، H_{td} ، والقيم الصغرى كانت للمسطحات البلاستيكية الغطاء، بينما القيم الكبرى كانت للمقطرات التي تستخدم الزجاج. كما مثلت النتائج رياضياً بالعلاقة التالية:

$$P_d = 0.0393 H_{td} \tag{4.6}$$

حيث: H_{td} ، بوحدات $\left(\text{MJ/m}^2\text{.day}\right)$ ، و P_d ، بوحدات $\left(l/\text{m}^2\text{.day}\right)$. يمكن استخدام العلاقة السابقة للتنبؤ بإنتاجية المقطرات الشمسية المسطحة بدقة في حدود $\pm 25\%$.



شكل (12.6) علاقة إنتاجية المقطر الشمسي السطحي مع شدة الإشعاع الشمسي

علاقة تجريبية أخرى تم استنتاجها من قبل (Riera, et al., 1978)، لدراسة تأثير الإشعاع الشمسي اليومي، H_{td}، $(MJ/m^2.day)$، درجة حرارة الهواء الجوي، T_a، $(^\circ C)$، وسرعة الرياح، V، (km/hr)،على معدل الإنتاجية اليومي، P_d، $(l/m^2.day)$، على الصورة التالية:

$$P_d = 0.244\,H_{td} - 0.0294 T_a - 0.0073 V - 0.01222 \qquad (5.6)$$

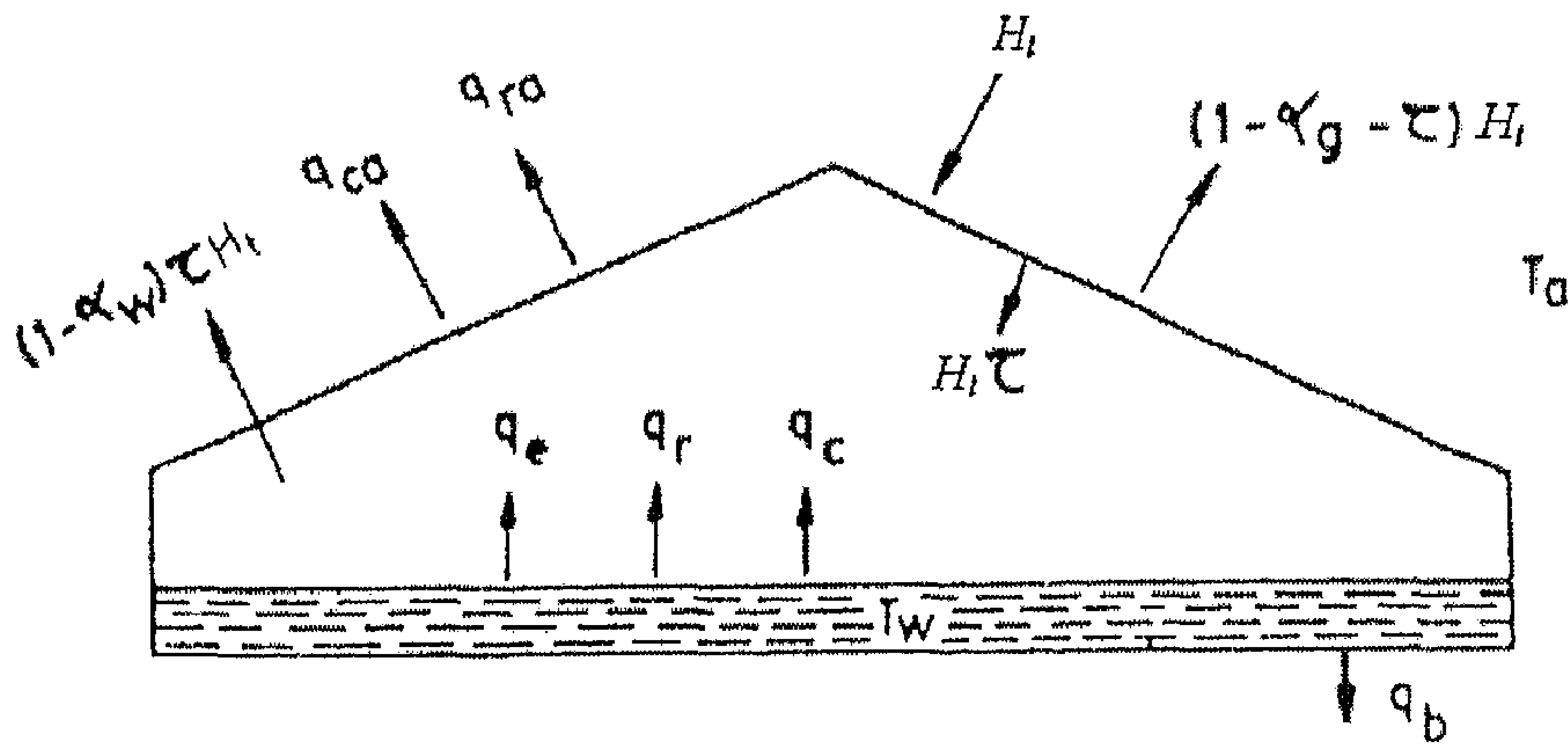
وكانت المعلومات التجريبية المستخدمة لمقطر شمسي سطحي في مدينة فاليسيا – أسبانيا، والقيم المتوسطة:

$H_{td} = 15.10\ MJ/m^2.day$، $T_a = 17\ ^\circ C$، $V = 6.73\ km/hr$، وكانت إنتاجية المقطر من الماء العذب: $P_d = 3.12\ l/m^2.day$.

2.4.6 التحليل الحراري للمقطر الشمسي السطحي أحادي التأثير

يمثل الشكل (13.6) آليات انتقال الحرارة الأساسية في المقطر الشمسي. إن الجزء الأكبر من الطاقة الشمسية، المباشرة والمنتشرة، الساقطة على المقطر، تُمتص في قاع حوض المقطر. وتحدث فواقد صغيرة بالانعكاس عند سطح الغطاء الزجاجي (أو البلاستيكي) للمقطر وسطح الماء. والطاقة الممتصة في قاع الحوض تنتقل إلى الماء في الحوض، وجزء يسير منها يتسرب إلى الأرض عن طريق التوصيل خلال قاعدة المقطر. والطاقة تنتقل من الماء إلى الغطاء الزجاجي، عموماً، بواسطة بخار الماء المتبخر من سطح الماء ويفقد حرارة التبخير في الغطاء الزجاجي، وبالتالي تتم عملية التكثيف. والطاقة تنتقل أيضاً من الماء إلى الغطاء الزجاجي عن طريق الحمل الحر خلال الهواء المحبوس في الحيز الفاصل بين الماء والغطاء الزجاجي. ويمتص الغطاء الزجاجي جزء من الحرارة عن طريق الإشعاع بينه وبين سطح الماء، ويمتص جزء صغير من الطاقة الشمسية الساقطة على المقطر أيضاً من قبل الغطاء

الزجاجي. هذه الطاقات المكتسبة في الغطاء الزجاجي يُنقل جزء منها إلى الهواء المحيط بواسطة الحمل والإشعاع الحراري. ويحدث تبادل الطاقة أيضاً بالأخذ بالحسبان تغير المحتوى الحراري المحسوس للماء المالح الداخل إلى المقطر، والماء المحلى الخارج والماء الآسن المتجمع في المقطر. والفقد الحراري يمكن أن يحدث أيضاً عن طريق تسرب بخار الماء والماء من المقطر. والدراسة الحرارية للمقطرات الشمسية يجب أن تأخذ بعين الاعتبار كافة آليات وأنماط الفقد الحراري هذه.



شكل (13.6) الاتزان الحراري لمقطر شمسي سطحي

وبهذا يمكن تعداد الموازنة الحرارية، من حيث الطاقة المكتسبة إلى المقطر كالتالي:

1. الطاقة الشمسية.

ومن حيث الطاقة المفقودة من المقطر فهي كالتالي:

1. الحمل الحراري للهواء الجوي؛
2. الاشعاع الحراري للهواء الجوي؛
3. انعكاس الأشعة الشمسية من سطح الزجاج والماء وقاع الحوض؛
4. التوصيل الحراري للأرض؛

5. الحمل الحراري للسطوح الجانبية المقطر؛
6. تسرب البخار؛
7. طرد الماء الآسن؛
8. الحرارة الكامنة للماء المتكثف.

الشكل (13.6) يوضح المركبات المختلفة لاتزان الطاقة واتجاهاتها. والمركبات الأساسية لفقدان الطاقة لمقطر شمسي سطحي نموذجي، يمكن تقسيمها إلى نسب مئوية من شدة الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح المقطر كما هو مبين في الجدول (7.6)، كما أوردها (Bloemer, et al., 1965).

جدول (7.6) عمليات الفقد الحراري وقيمتها كنسبة من شدة الإشعاع الشمسي

	العملية الحرارية	القيمة كنسبة من شدة الإشعاع الشمسي، ٪
.1	تبخير الماء (الكفاءة)	31
.2	فواقد الطاقة من الجوانب والأرض	2
.3	الأشعة الشمسية المنعكسة من المقطر	11
.4	الأشعة الشمسية الممتصة في الغطاء الزجاجي	5
.5	الاشعاع من حوض الماء إلى الغطاء الزجاجي	26
.6	الحمل الداخلي بين الماء والغطاء الزجاجي	8
.7	إعادة تبخير الماء المحلى، وفواقد أخرى غير محسوبة	17
	المجموع	**100**

قبل البدء في عملية التحليل الحراري للمقطر، لا بد من فرض بعض الفرضيات لتسهيل التحليل، وهي كالتالي:

1. الغطاء الزجاجي بمساحة A_g، والتي تساوي المساحة السطحية للماء في حوض المقطر، A_w، (أي أن $A_g = A_w$).

2. سطح الماء والغطاء الزجاجي تعتبر سطوحاً رمادية.
3. درجة حرارة الماء في حوض المقطر ثابتة وتساوي T_w.
4. درجة حرارة الغطاء الزجاجي ثابتة وتساوي T_g.
5. الحرارة النوعية c_p للماء المحلى والمالح والآسن، متساوية.
6. تعتبر السماء سطح أسود.
7. الغطاء الزجاجي معرض فقط للسماء.
8. الخواص الحرارية ثابتة لكل مركبات المقطر.

بهذه الفرضيات يمكن كتابة معادلة الاتزان الحراري لكل المقطر على الصورة التالية:

$$\alpha_g H_t + \tau_g \alpha_w H_t = q_{ga} + q_b + c_s\left(\frac{dT_w}{dt}\right) + q_f \qquad (6.6)$$

حيث: τ_g ،α_g – امتصاصية ونفاذية الزجاج للأشعة الشمسية، على التوالي؛

α_w – امتصاصية الماء للأشعة الشمسية؛

H_t – الأشعة الشمسية الكلية الساقطة على وحدة مساحة المقطر، $\mathrm{W/m^2}$؛

q_{ga} – الفقد الحراري بين الغطاء الزجاجي والهواء الجوي على وحدة المساحة، $\mathrm{W/m^2}$

$$q_{ga} = (h_{cga} + h_{rga})(T_g - T_a) \qquad (7.6)$$

حيث: h_{cga} – معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الغطاء الزجاجي والهواء (معامل الرياح)، على وحدة المساحة، $\mathrm{W/m^2.K}$ ، ويُعطى بعلاقة (McAdams, 1954):

$$h_{cga} = a + b\,V^{n} \quad (8.6)$$

حيث: V - سرعة الرياح، km/hr ، a ,b ,n - ثوابت تعين من الجدول (8.6)

جدول (8.6) قيم للاستخدام في معادلة h_{cga} السابقة

$18 < V < 110$ km/hr			$V < 18$ km/hr			**طبيعة سطح الغطاء**
n	b	a	n	b	a	
0.78	2.64	0	1	1.09	5.61	**أملس**
0.78	2.80	0	1	1.19	6.18	**خشن**

h_{rga} - معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الغطاء الزجاجي

$$h_{rga} = \frac{\sigma}{\frac{1-\varepsilon_g}{\varepsilon_g} + \frac{1}{F_{gs}}} \frac{\left(T_g^4 - T_{sky}^4\right)}{\left(T_g - T_a\right)} \quad (9.6)$$

حيث: F_{gs} - معامل الشكل بين الغطاء الزجاجي والسماء ويساوي:

$$F_{gs} = \frac{1}{2}\left(1 + \cos s\right) \quad (10.6)$$

حيث: s - زاوية ميل الغطاء الزجاجي، درجة.

q_b - الفقد الحراري من جوانب وقاعدة المقطر والمحيط على وحدة المساحة، W/m^2

$$q_b = h_b\left(T_w - T_b\right) \quad (11.6)$$

حيث: h_b - معامل الفقد الحراري للفواقد الحرارية بين قاعدة وجوانب المقطر والمحيط على وحدة مساحة المقطر.

T_b، تمثل درجة حرارة القاعدة من الجهة الخارجية للمقطر.

q_f - الطاقة المكتسبة من قبل الماء في الحوض على وحدة المساحة، W/m^2

$$q_f = \dot{m}_w c_{pw} (T_w - T_{win}) \tag{12.6}$$

حيث: $\dot{m}_w$ - معدل تدفق الماء المالح في المقطر على وحدة مساحة المقطر، $kg/s.m^2$، عند درجة حرارة، T_{win}

c_s - الحرارة النوعية لمكونات المقطر على وحدة المساحة، $J/kg.K.m^2$

t - الزمن، s

الاتزان الحراري للغطاء الزجاجي يُعطى بالمعادلة التالية:

$$q_{ga} = q_r + q_c + q_e + \alpha_g H_t \tag{13.6}$$

حيث: q_e - الكسب الحراري من بخار الماء إلى الغطاء الزجاجي، على وحدة المساحة، W/m^2

$$q_e = 0.0061\left[(T_w - T_g) + \left(\frac{P_w - P_g}{0.265 - P_w}\right)(T_w + 273)\right]^{1/3} \times (P_w - P_g) L_w \tag{14.6}$$

حيث L_w - الحرارة الكامنة لتبخير الماء J/kg عند درجة حرارة تشبع الماء، T_w . P_w , P_g - الضغط الجزئي للماء، MN/m^2، عند درجة حرارة T_w، T_g، على التوالي

q_c - الكسب الحراري بالحمل بين الغطاء الزجاجي والماء على وحدة المساحة، W/m^2، من (Dunkle, 1961)

$$q_c = 0.8831\left[\left(T_w - T_g\right) + \left(\frac{P_w - P_g}{0.265 - P_w}\right)\left(T_w + 273\right)\right]^{1/3} \times \left(T_w - T_g\right) \qquad (15.6)$$

q_r – الكسب الحراري بالإشعاع بين سطح الماء والغطاء الزجاجي على وحدة مساحة المقطر، W/m^2

$$q_r = h_{rgw}\left(T_w - T_g\right) \qquad (16.6)$$

حيث: h_{rgw} – معامل الإشعاع الحراري بين الماء والغطاء الزجاجي ويعطى بالعلاقة:

$$h_{rgw} = \frac{\sigma\left(T_w^2 + T_g^2\right)\left(T_w + T_g\right)}{1/\varepsilon_w + 1/\varepsilon_g - 1} \qquad (17.6)$$

حيث: ε_w , ε_g – انبعاثية الماء والزجاج، T_w, T_g – درجات الحرارة الماء والزجاج، على التوالي، بوحدات K

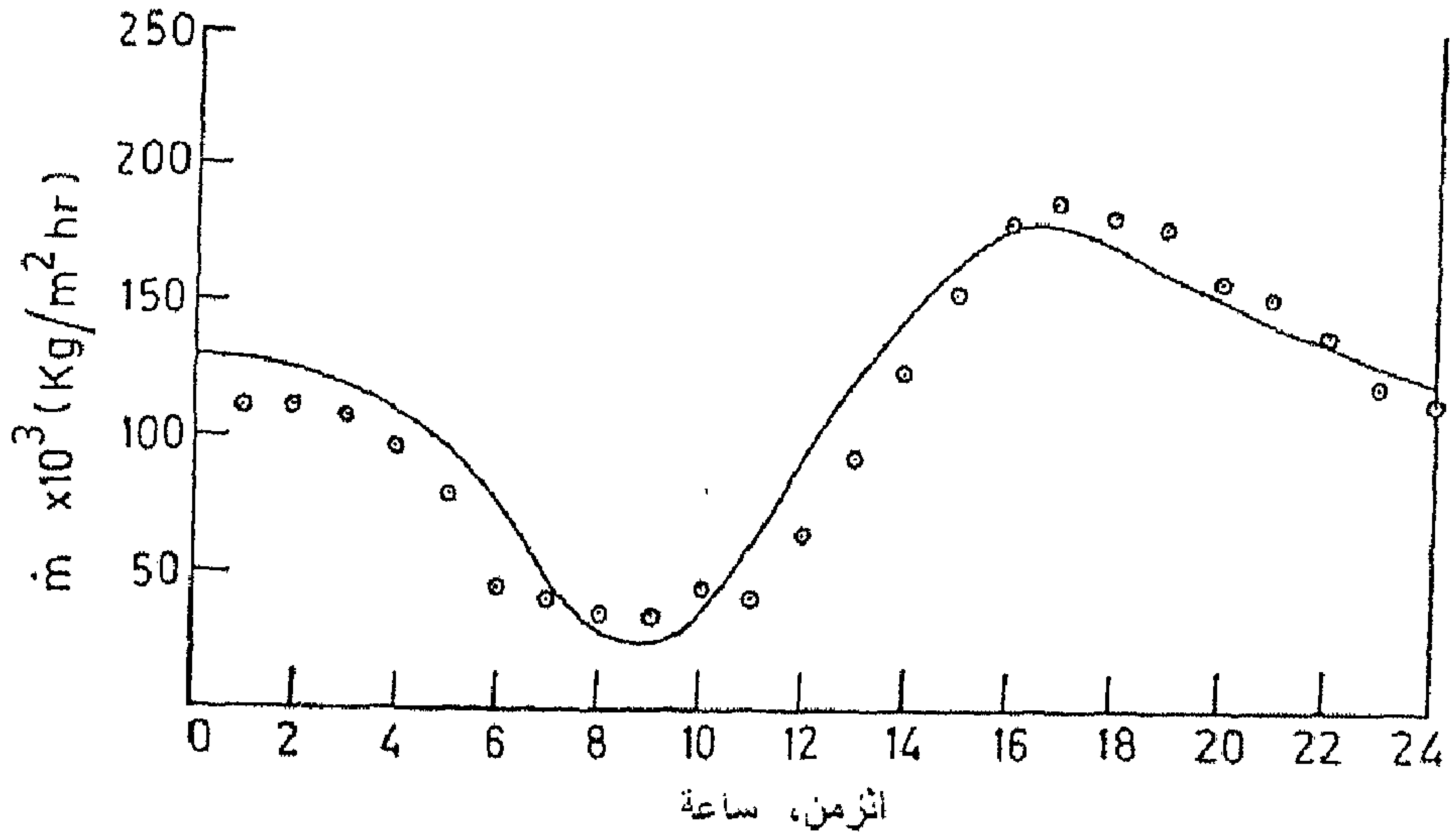
σ – ثابت بولتزمان $\sigma = 5.67\times10^{-8}\ W/m^2K^4$

وتعتمد معدل إنتاجية الماء العذب P للمقطر على وحدة المساحة على مدة التشغيل، وقيمتها اللحظية تُعطى بالعلاقة التالية:

$$P = \frac{q_e}{L_{hg}} \qquad (18.6)$$

حيث: L_{hg} – الحرارة الكامنة للماء عند درجة حرارة الغطاء الزجاجي.

الشكل (14.6) يبين مقارنة لنتائج تجربة وحسابات لتغير إنتاجية المقطر الشمسي مع الزمن، (Nayak, et al., 1980).



شكل (14.6) تغير إنتاجية المقطر الشمسي مع الزمن

وبهذا تكون إنتاجية المقطر اليومية P_d :

$$P_d = \sum P.\Delta t \tag{19.6}$$

حيث: Δt ، تمثل الفترة الزمنية. الكفاءة التشغيلية اليومية η_d للمقطر يمكن صياغتها على الصورة التالي:

$$\eta_d = \frac{\sum q_e}{\sum H_t} \tag{20.6}$$

المعادلات السابقة، تبين أن أداء المقطر الشمسي تتحكم به مجموعة من المعادلات الآنية اللاخطية. حل هذه المعادلات ممل ويستهلك الكثير من الوقت، ويمكن تحقيقه فقط عن طريق التقنيات الرقمية.

ولدراسة الأداء الحراري للمقطرات الشمسية يمكن إتباع الإجراءات التالية:

1. عين كلا من: $V, T_a, h_b, \tau_g, \alpha_g, \alpha_w, c_s$.
2. حدد درجة الحرارة الابتدائية للماء في حوض المقطر.

3. احسب h_{ga} باستخدام المعادلة (8.6) والجدول (8.6).
4. احسب H_t عند زمن اختبار أداء المقطر، بأي طريقة من الطرق المدروسة سابقاً.
5. افرض قيمة T_g، (هذه القيمة يجب أن تكون بطبيعة الحال بين T_w و T_a).
6. احسب q_r, q_c, q_e من المعادلات (14.6)، (15.6)، (16.6) على التوالي.
7. أحسب q_{ga} من المعادلة (7.6).
8. اختبر تحقيق المعادلة (13.6)، إذا لم تحققها كرر الخطوات من الخطوة 5 إلى الخطوة 8.
9. احسب q_f ،q_b من المعادلات (11.6)، (12.6)، على التوالي.
10. احسب (dT_w/dt) من المعادلة (6.6).
11. احسب ΔT_w المقابل للخطوة الزمنية Δt.
12. احسب درجة حرارة الماء عند نهاية كل فترة زمنية $(= T_w + \Delta T_w)$.
13. كرر الخطوات من الخطوة 5 إلى الخطوة 12.

والإجراء السابق يستهلك الكثير من الوقت ويُنصح عادة باستخدام الحاسوب لحل هذه المعادلات. المثال التالي يسرح استخدام الإجراءات السابقة.

مثال 1.6

مقطر شمسي سطحي، مساحة الغطاء الزجاجي $2\,\mathrm{m}^2$، يقع على خط عرض $21.5°$ شمالاً وخط طول $31.5°$ غرباً. الغطاء متجه $10°$ غرباً من الجنوب ويميل بزاوية $20°$ عن الأفقي. الغطاء مصنوع من الزجاج بامتصاصية حوالي 0.1 $(\alpha_g = 0.1)$ ونفاذية حوالي 0.89 $(\tau_g = 0.89)$. انبعاثية كل من الزجاج والماء على التوالي 0.96 و 0.94. الاختبار المعملي للمقطر بين أنه في 21 يوليو على تمام الساعة 11:00 صباحاً، كانت درجة حرارة الماء في حوض المقطر $60°\mathrm{C}$، والظروف

الجوية المحيطة كانت $42^\circ C$ ، والرياح بسرعة 10 km/hr. أوجد درجة حرارة الماء في حوض المقطر، معدل إنتاجية المقطر، والكفاءة التشغيلية للمقطر عند 12:00، 1:00، 2:00 مساءاً. يمكنك استخدام القيم التالية: $\alpha_w = 0.8$، $c_s = 0.32\ MJ/^\circ C.m^2$، $h_b = 5.0\,W/^\circ C.m^2$، $\dot{m}_w = 0.72\,kg/hr.m^2$. أعتبر الطاقة الشمسية الساقطة على الغطاء الزجاجي عند 11:00، 12:00، 1:00، 2:00، على التوالي: 838، 927، 933، 930، W/m^2.

الحل:

بإتباع الخطوات العامة الموضحة أعلاه:

1. $c_s = 0.32\times10^6\ J/^\circ C.m^2$ ، $\alpha_g = 0.1$

$\alpha_w = 0.8$ ، $\varepsilon_g = 0.89$

$h_b = 5\,W/^\circ C.m^2$ ، $T_a = 42^\circ C$

$V = 10\ km/hr$ ، $\dot{m}_w = 2\times10^{-4}\ kg/s.m^2$

2. $T_w = 60^\circ C$.
3. قيم H_t تؤخذ كما أُعطيت في المعطيات.
4. بفرض $T_g = 50^\circ C$.
5. حساب مركبات الكسب الحراري بين الغطاء الزجاجي والماء في المقطر، q_r، q_c، q_e، على النحو التالي:

- أما الكسب الحراري بين بخار الماء والغطاء الزجاجي فيحسب من المعادلة (14.6):

$$q_e = 0.8831\left[(60-50)+\left(\frac{0.0199-0.0123}{0.265-0.0199}\right)(60+273)\right]^{1/3}\times$$
$$(0.0199-0.0123)\times2358\times10^3 = 298.33\ W/m^2$$

- الكسب الحراري بالحمل في المسافة الفاصلة بين الماء والغطاء الزجاجي فيحسب من المعادلة (15.6):

$$q_c = 0.8831\left[(60-50)+\left(\frac{0.0199-0.0123}{0.265-0.0199}\right)(60+273)\right]^{1/3} \times$$

$$(60-50) = 24.1 \text{ W/m}^2$$

- الكسب الحراري بالإشعاع بين الماء والغطاء الزجاجي من المعادلة (16.6)، يجب حساب معامل انتقال الحرارة بالإشعاع من المعادلة (17.6)، والذي يساوي: $h_{rgw} = 7.205 \text{ W/m}^2\text{K}$ ، وبالتالي:

$$q_r = 7.205(60-50) = 72.05 \text{ W/m}^2$$

6. لحساب الفقد الحراري بين الغطاء الزجاجي والهواء الجوي من المعادلة (7.6)، يجب حساب معامل الفقد الحراري بالحمل من المعادلة (8.6). بفرض سطح الغطاء الزجاجي أملس، وبما أن $V = 10$ km/hr ، فانه من الجدول (8.6) نجد قيم الثوابت: $a = 5.61$, $b = 1.09$, $n = 1$، وبهذا:

$$h_{cga} = 5.61 + 1.09 \times 10 = 16.51 \text{ W/}^\circ\text{C.m}^2$$

معامل الفقد الحراري بالإشعاع بين الغطاء الزجاجي والهواء الجوي من المعادلين (9.6) و(10.6):

$$h_{rga} = 14.46 \text{ W/}^\circ\text{C.m}^2$$

وبهذا يكون معامل الفقد الحراري الكلي بين الغطاء الزجاجي والهواء الجوي:

$$q_{ga} = (16.51 + 14.46)(50-42) = 247.76 \text{ W/m}^2$$

7. اختبر تحقيق المعادلة (13.6). وإذا لم تتحقق المعادلة، وجب تكرير الحسابات

من الخطوة 5 حتى الخطوة 8 وذلك بفرض قيمة أخرى T_g. هذه المحاولات لُخصت في الجدول (9.6) كما يلي:

جدول (9.6) حل المثال 1.6

				حلقات التكرار لتعيين T_g										
ΔT_w	$c_s \frac{dT_w}{dt}$	q_f	q_b	الخطأ %	المعادلة (13.6)	q_{ga}	q_e	q_r	q_c	T_g	المحاولة رقم	H_t W/m^2	T_w °C	الزمن
				95	478	248	298	72	24	50	1	838	60	11:00
				10	348	316	198	51	15	53	2			
2.8	248	15	90	0	328	328	182	48	14	53.5	3			
				17	425	364	256	58	18	55	1	927	62.8	12:00
				7	401	376	237	55	16	55.5	2			
2.8	248	17	104	0	384	384	224	52	15	55.8	3			
				4	452	435	283	58	18	58	1	933	65.6	1:00
2	180	20	118	0	440	440	273	57	17	58.2	2			
				18	541	459	360	67	21	59	1	930	67.6	2:00
1.4	124	21	128	0	482	482	312	59	18	60	2			

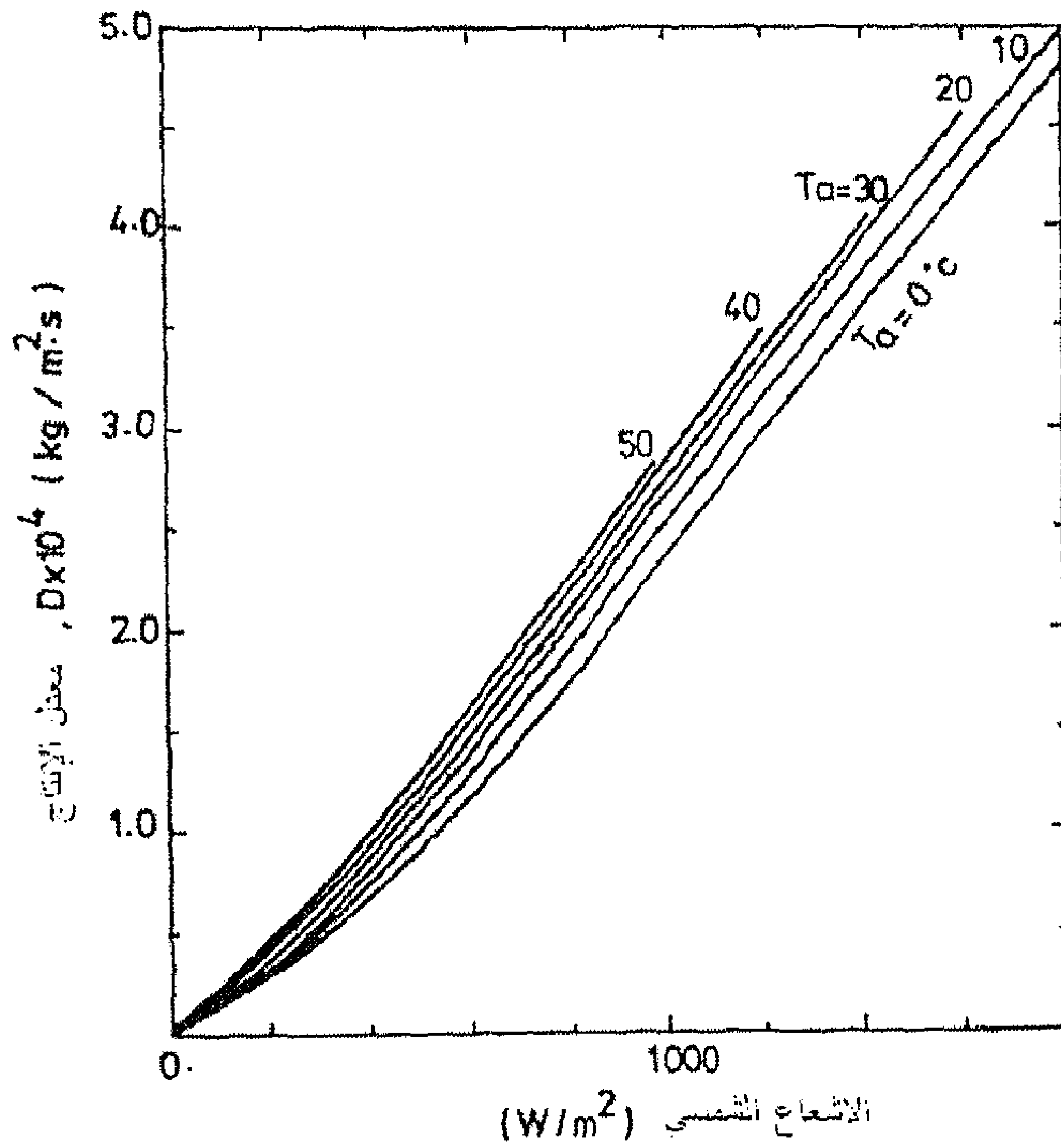
5.6 تأثير المتغيرات الجوية والتصميمية على إنتاجية المقطر

1.5.6 تأثير شدة الإشعاع الشمسي

من أهم العوامل التي تؤثر في أداء المقطر الشمسي هو شدة الإشعاع الشمسي. حيث تتناسب الإنتاجية طردياً مع شدة الإشعاع الشمسي. ويمكن تمثيل ذلك بالشكل (15.6). وفي مدى درجات حرارة الهواء الجوي حوالي 20 – 40 درجة مئوية، فان معدل إنتاج kg/m^2s يمكن التنبأ به من معادلة (Cooper, 1973) التالية:

$$\dot{m} = 3.125\times10^{-4} H_t - 3.438\times10^{-5} \qquad (21.6)$$

حيث H_t، شدة الاشعاع الشمسي الكلي، kW/m^2.



شكل (15.6) العلاقة بين أقصى معدل إنتاجية والفيض الشمسي الساقط على المقطر الشمسي عند قيم مختلفة من درجات حرارة الهواء الجوي

2.5.6 تأثير درجة حرارة الهواء الجوي

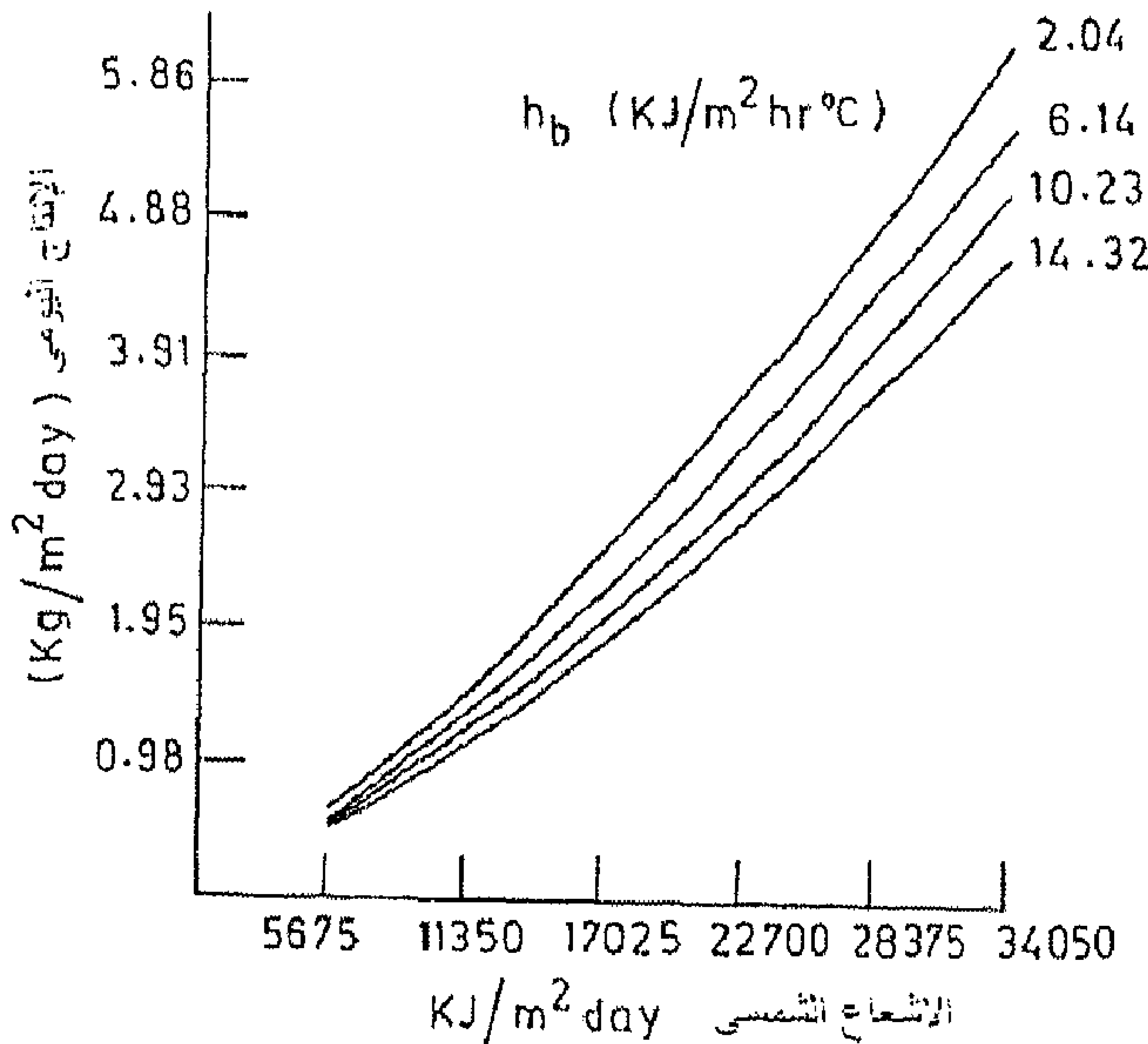
بيت دراسة (Morse, et al.,1968)، أن تغير درجات حرارة الهواء الجوي من 26.7 إلى 37.8 درجة مئوية، تسبب زيادة في الإنتاج بنسبة 11% والتغير من 26.7 إلى 15.6 درجة مئوية يسبب خفض الإنتاج بنسبة 14%. استنتج (Cooper, 1969) أيضاً إن انخفاض درجة حرارة الهواء الجوي تسبب في خفض الإنتاج. في هذه الحالة، فان درجات حرارة الغطاء الزجاجي والماء ستقل، حتى إذا زاد الفرق في درجات حرارة الغطاء والماء، فلن يعوض هذا الهبوط في درجة حرارة المنظومة ككل. هذا الاستنتاج يتوافق مع دراسة سابقة أجراها (Lof, et al., 1961)، والظاهرة مفسرة جيداً عن طريق زيادة h_{cw}, h_{eff} بزيادة $\overline{T}_w$.

3.5.6 تأثير سرعة الرياح

لمتوسط سرعة رياح من 0 إلى 2.15 m/s، فإن الإنتاج يزيد بمعدل 11.5%، بينما لسرعة رياح 2.15 إلى 8.81 m/s، فان الزيادة في الإنتاج ستكون فقط 1.5% (Cooper, 1973). تأثير الرياح بالتفصيل دُرس من قبل (Soliman, 1972)، باعتبار كافة أنماط انتقال الحرارة والكتلة في النظام. وأستنتج أن عند درجات حرارة مرتفعة للماء، فان زيادة الفرق بين درجات حرارة الماء والغطاء الزجاجي عن طريق زيادة سرعة الرياح تسبب في زيادة معدل التبخير.

4.5.6 تأثير فقد الطاقة من قاعدة وجوانب المقطر

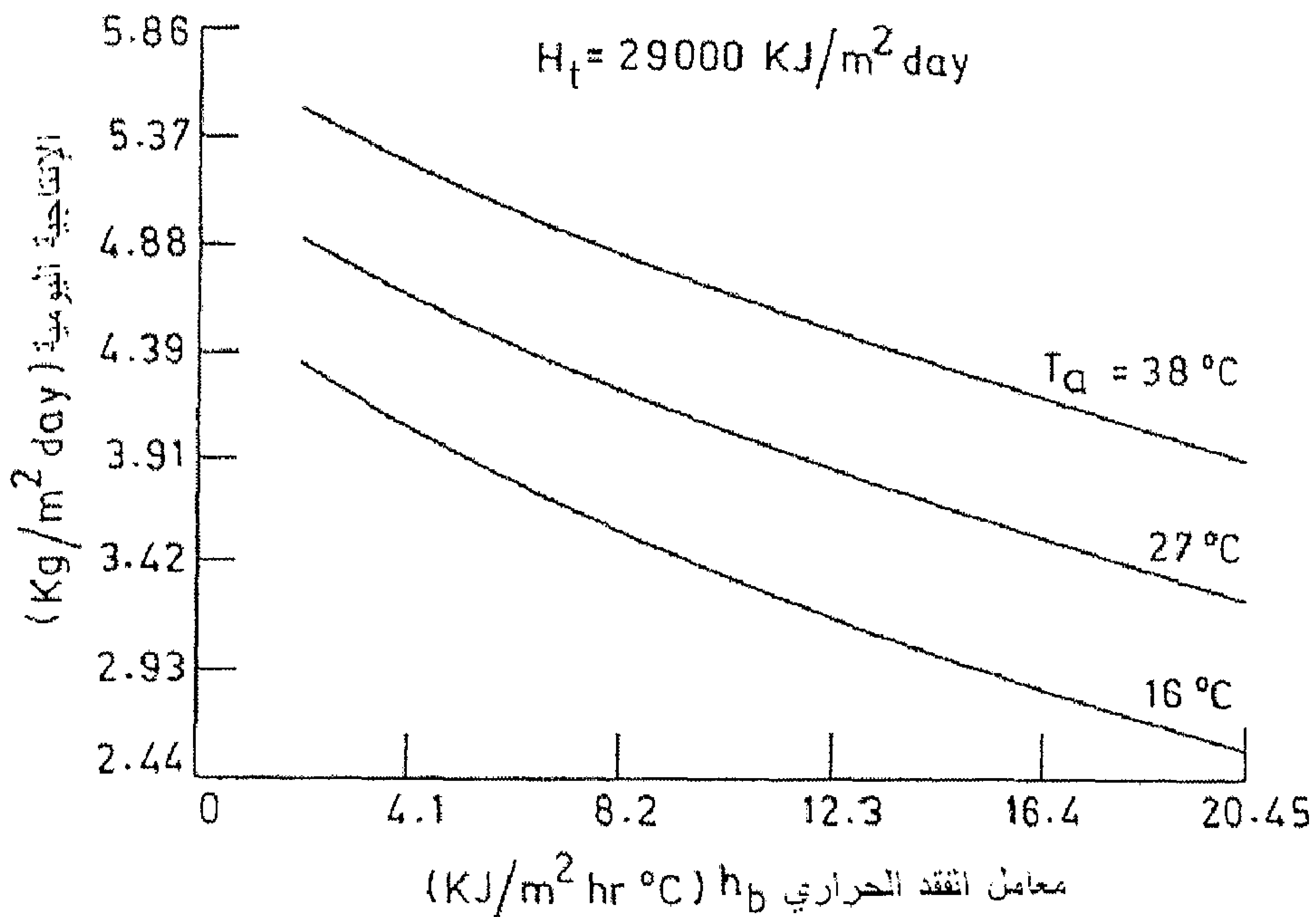
إن إنتاج المقطر يزيد بتحسين عزل المقطر عن المحيط الجوي. والنتائج المتحصل عليها (Morse, 1968)، وُضحت بالشكلين (16.6)، (17.7)، حيث تبين العلاقة بين فقد الطاقة بدلالة كلٍ من شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الهواء الجوي كدالة في الإنتاجية اليومية للمقطر. ويتضح من الشكل (17.7) أن معامل الفقد له تأثير أقل عندما تكون درجات حرارة الهواء الجوي مرتفعة. إن تقليل معامل الفقد 5 مرات يؤدي إلى زيادة في الإنتاجية بحوالي 45%.



شكل (16.6) تأثير الإشعاع الشمسي ومعامل الفقد الحراري على إنتاجية المقطر الشمسي

5.5.6 تأثير الغطاء الزجاجي المزدوج وزاوية ميل الغطاء

إن للحاجز الحراري بين الغطائين الزجاجين، يقلل من طرد الحرارة خلال عملية التكثيف، وبالتالي سيقل الإنتاج بمعدل 25 – 35%. وزيادة الموصلية الحرارية للهواء الفاصل بين الغطائين الزجاجين يؤدي إلى تحسين بسيط في الأداء، ولكن التأثيرات الكلية لانتقال الحرارة بالإشعاع والحمل خلال الفاصل الهوائي يؤدي إلى تقليل الإنتاج. ومن الناحية الاقتصادية والإنشائية، فان إزدواجية الأغطية يزيد من التكلفة الكلية للمقطر.



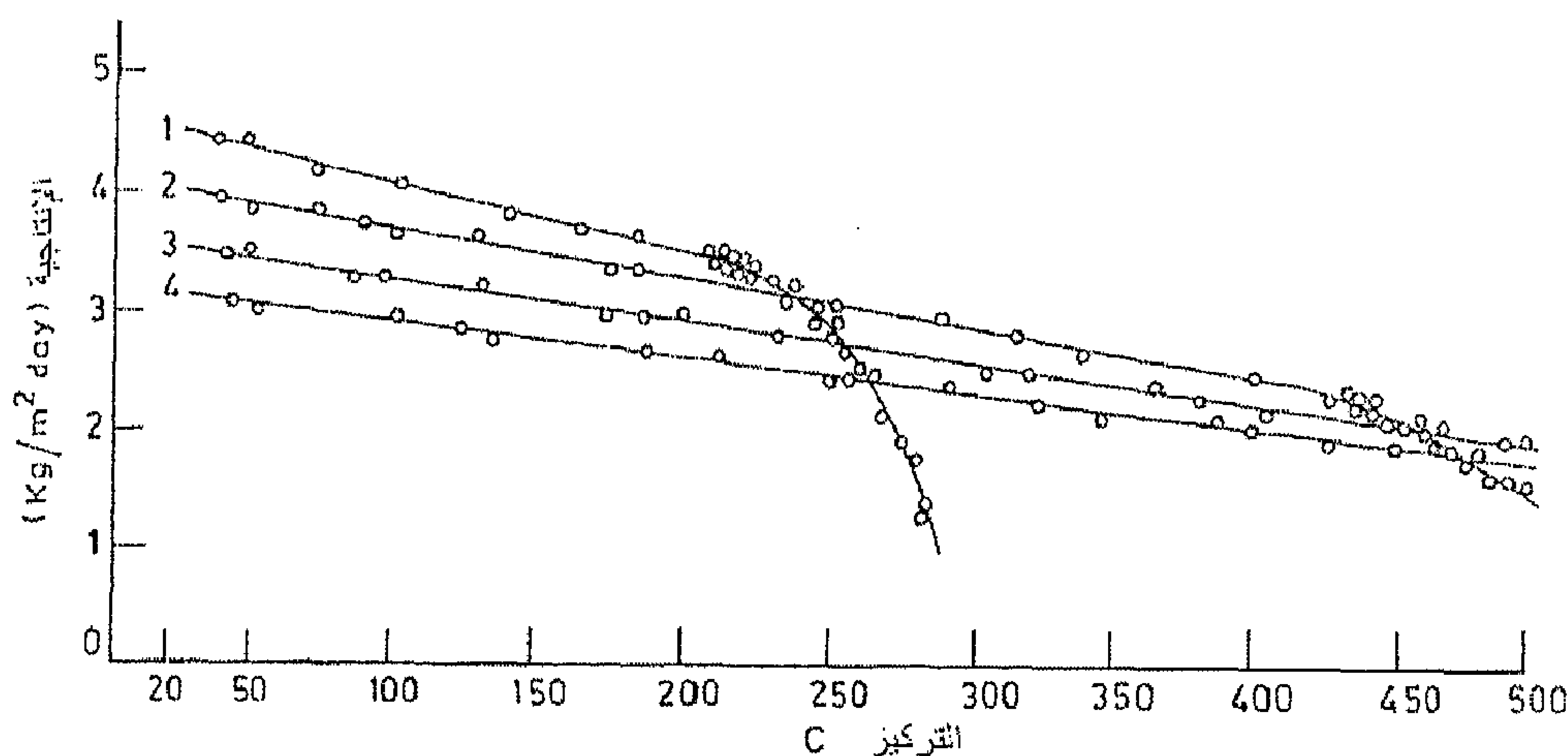
شكل (17.6) تأثير معامل الفقد الحراري على إنتاجية المقطر الشمسي عند قيم مختلفة من درجة حرارة الهواء الجوي

وجد (Cooper, 1969) أن معدل التبخير يقل لزاوية ميل تتراوح من 0 إلى 45 درجة، ويرتفع معدل التبخير عند 60 درجة ويقل مرة أخرى بعد

75 درجة. (Garg, et al., 1976)، بين إن الإنتاجية لا تتغير بشدة مع زاوية ميل الغطاء الزجاجي، واقترح وللمناخ الهندي زاوية ميل بين 10-15 درجة. بينما وجد (Satcunanathan, et al., 1973)، أن زاوية ميل 20-25 درجة عن الأفقي أظهرت نتائج مرضية لمدى واسع من المقطرات الشمسية.

6.5.6 تأثير تركيز الأملاح

تأثير تركيز الأملاح في إنتاجية المقطر الشمسي تم دراسته بتوسع من قبل (Baibutaev, et al., 1970). تجارب عديدة تمت على عينات أُخذت من بحيرات مختلفة بنسب تراكيز أملاح مختلفة. تركيز الأملاح في الماء تم تثبيته خلال عملية التحلية بواسطة إضافة ماء محلى إلى الحوض مع إبقاء مستوى الماء ثابتاً في حوض المقطر (حوالي 10-12 mm). بينت هذه التجارب أن زيادة نسبة تركيز الأملاح أدت إلى هبوط بطئ في الإنتاجية، كما هو مبين في الشكل (18.6). بالإضافة إلى زيادة في التآكل في أسطح المقطر بزيادة نسبة تركيز الأملاح وهذا سيزيد من تكلفة التشغيل، مما سيؤثر على سعر المنتج سلباً.



شكل (18.6) تأثير تركيز الأملاح على إنتاجية المقطر الشمسي

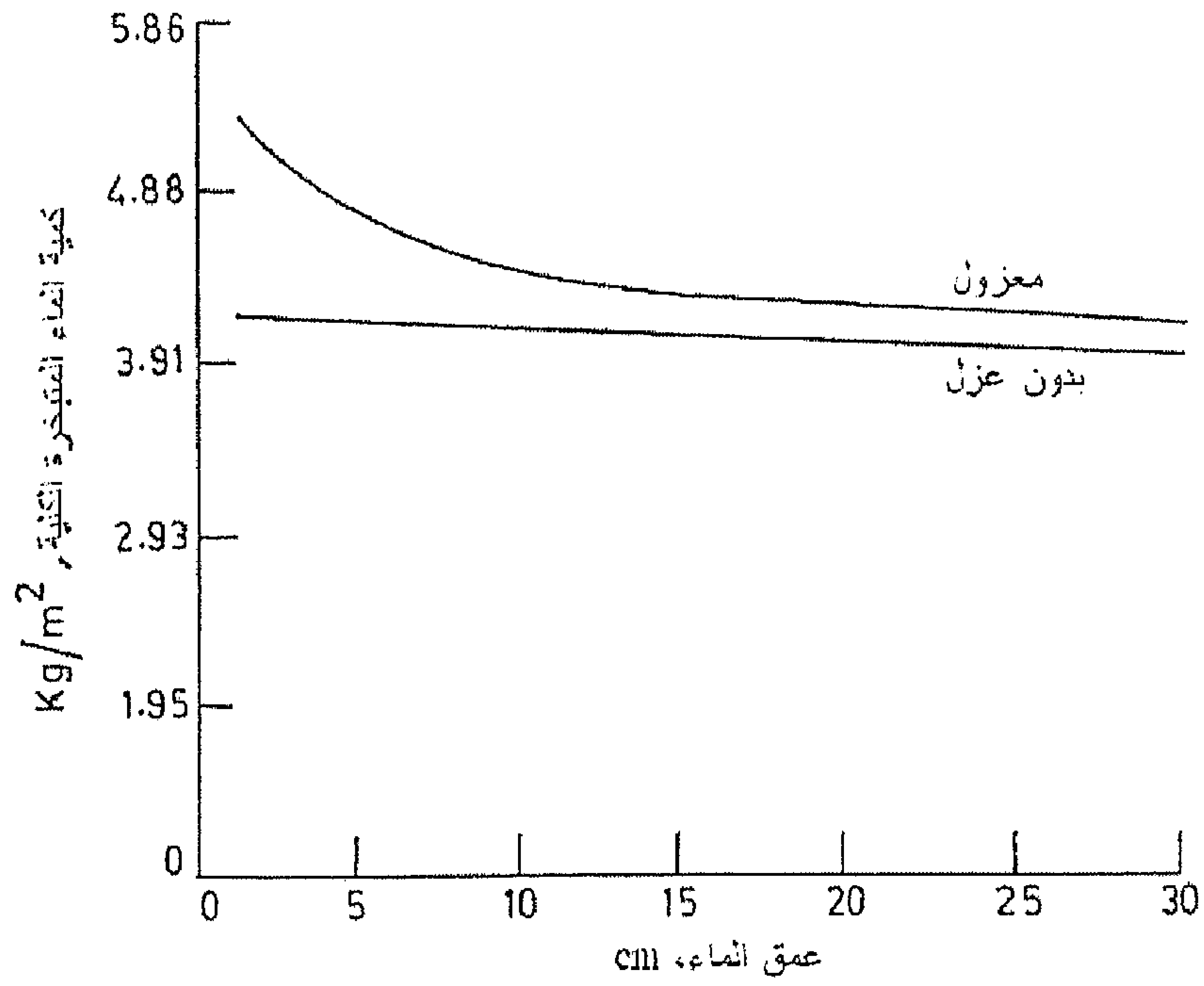
7.5.6 تأثير السعة الحرارية للماء

درس (Morse, et al., 1968) تأثير السعة الحرارية للماء على أداء المقطر. وأوصوا بارتفاع منسوب المياه في حوض المقطر إلى 76 mm تقريباً، المقابل لسعة حرارية 1.41 $kJ/m^{2}{}^{\circ}C$. لشدة إشعاع يومي 225 $kJ/m^{2}hr$ ، وبتقليل السعة الحرارية من 1.41 $kJ/m^{2}{}^{\circ}C$ إلى الصفر، تزيد الإنتاجية بحوالي 9%، بينما زيادة السعة من 1.41 إلى 5.64 $kJ/m^{2}{}^{\circ}C$ (المكافئة لعمق ماء حوالي 0.3 m) سيقلل الإنتاجية حوالي 7%. يدل هذا على أن عمق الماء ليس بالمتغير الحرج ويجب أن يكون أقل ما يمكن.

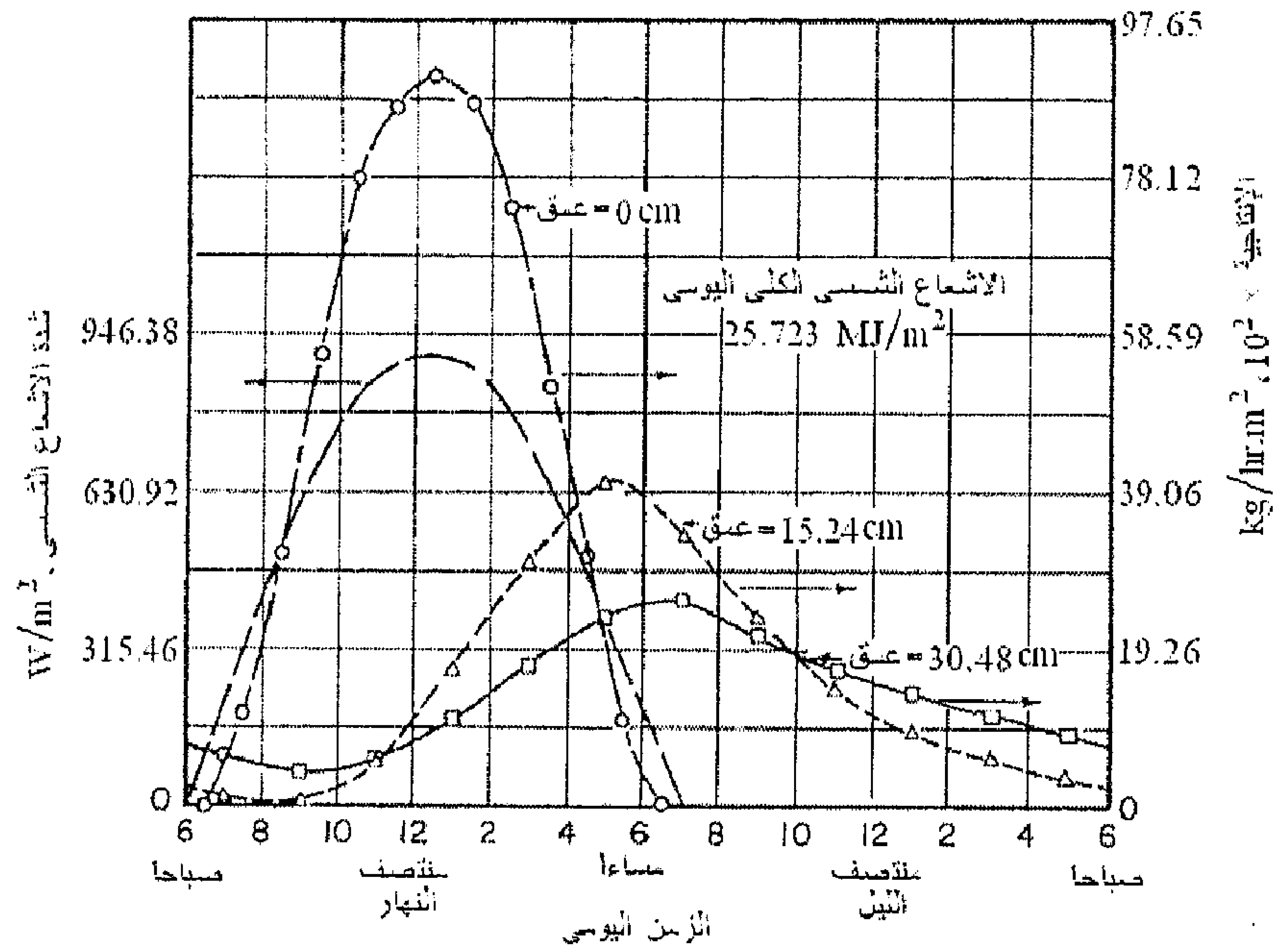
كما قام (Cooper, 1969) أيضاً بدراسة تأثير عمق الماء في حوض المقطر على إنتاجيته، والنتائج المتحصل عليها وضحت بالشكل (19.6). ومن الواضح أنه بدون عازل فان الكسب من تقليل عمق الماء يكون هامشياً، ولكن يختلف الوضع في وجود العازل، ويصبح الفرق أكثر حدة. ووجد اختلاف يقدر بحوالي 30% عند زيادة عمق الماء من 1.27 إلى 30.48 cm ، والذي يوافق ما توصل إليه (Bloemer, et al., 1965). الشكل (20.6) يبن تأثير عمق الماء على إنتاجية المقطر اللحظية، (Lof, 1961).

8.5.6 تأثير المسافة الفاصلة بين سطح الماء والغطاء الزجاجي

استنتج (Satcunanathan, et al., 1973)، أن إنتاجية المقطر تزيد بتقليل المسافة الفاصلة بين سطح الماء والغطاء الزجاجي.



شكل (19.6) تأثير عمق الماء في حوض المقطر على إنتاجية المقطر الشمسي

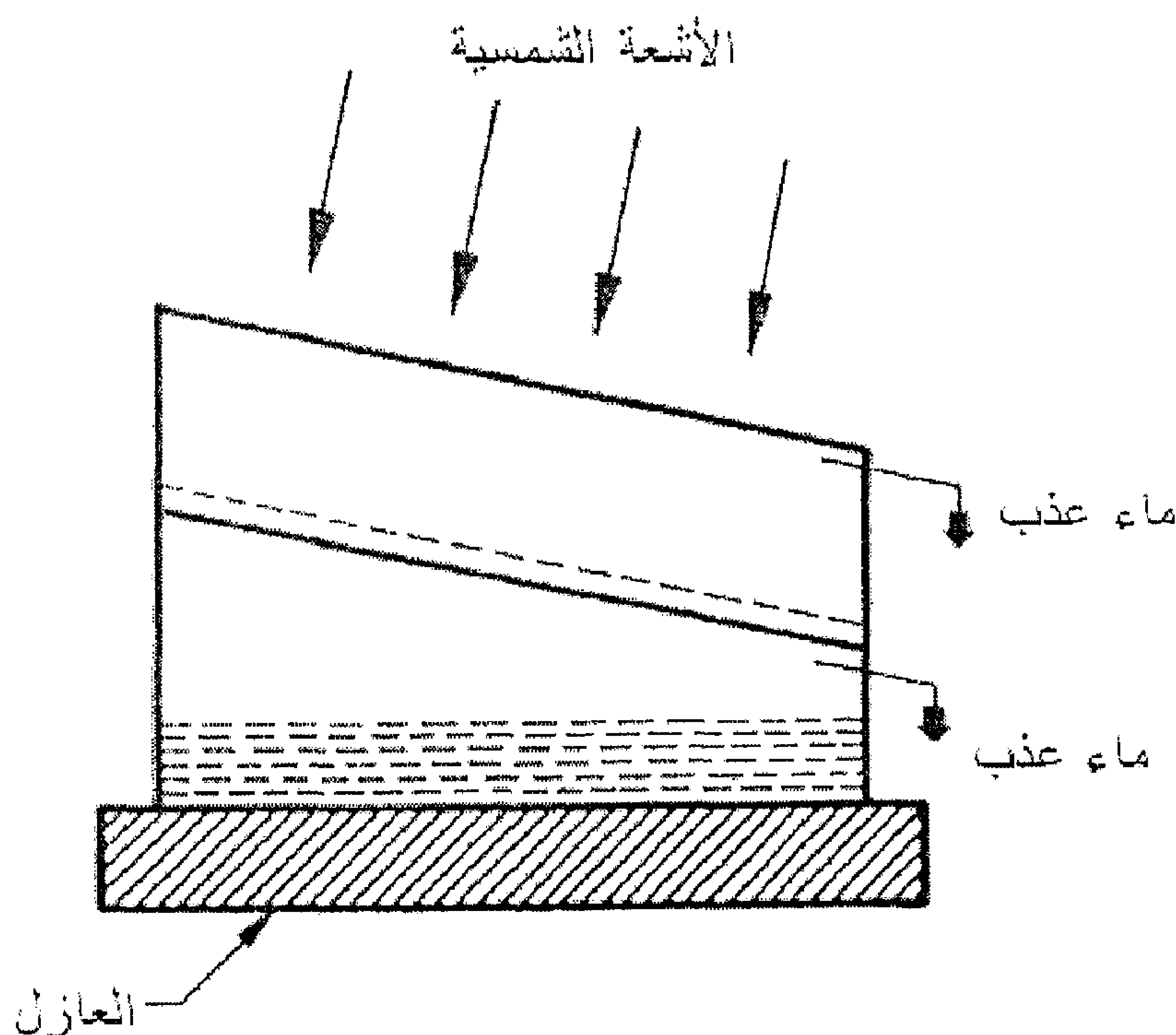


شكل (20.6) التغير الزمني النظري على أداء المقطرات الشمسية عند اختلاف عمق الماء في حوض المقطر

6.6 بعض التصاميم الأخرى للمقطرات الشمسية السطحية (نوع الحوض)

1.6.6 مقطر شمسي متعدد الأحواض

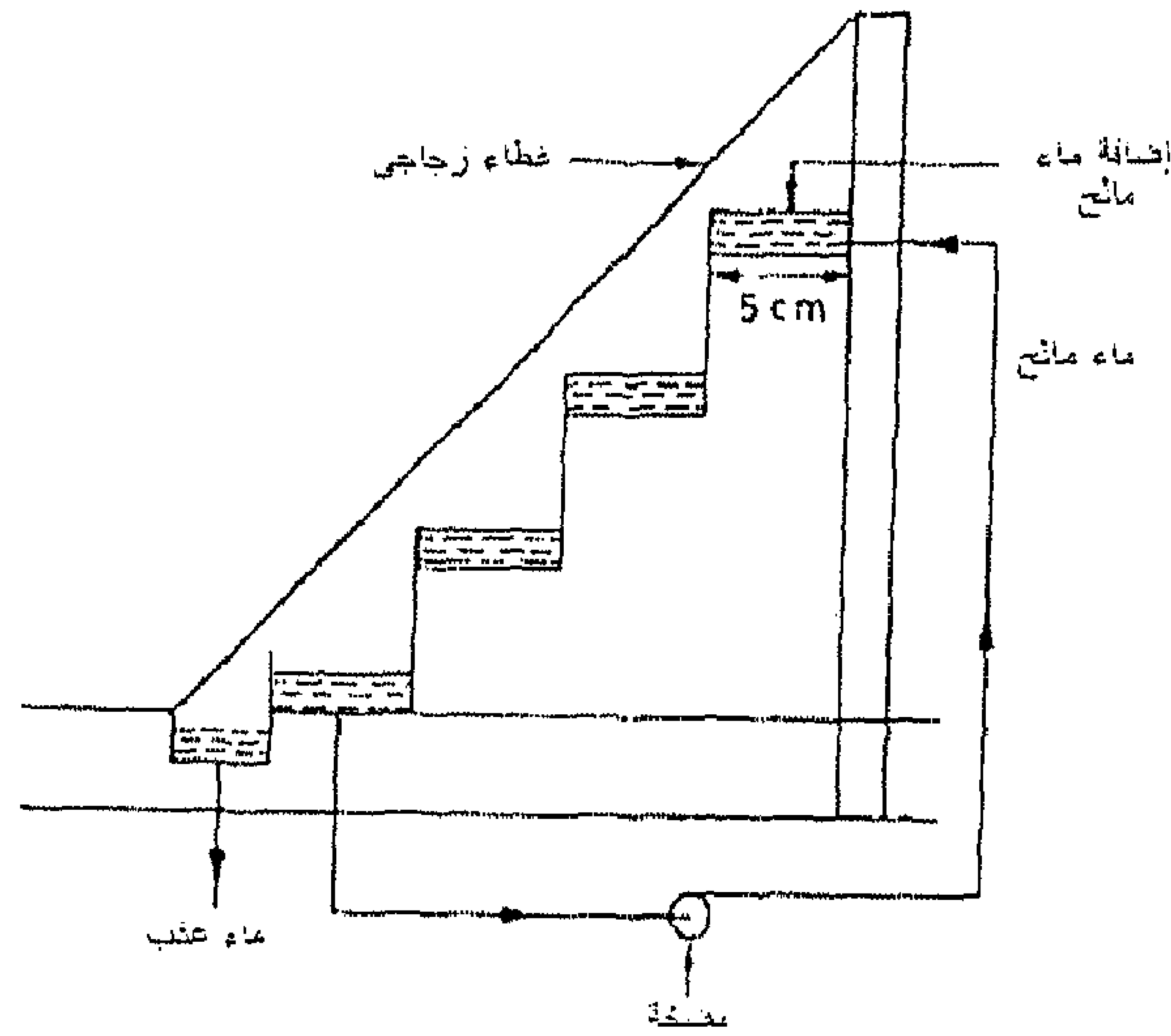
استخدم (Sodha, et al., 1980) المقطر مزدوج الأحواض المبين في الشكل (21.6). المقطر المزدوج الأحواض يشبه المقطر السطحي ولكن يضاف سطح شفاف (غالباً من الزجاج) أخر بين الغطاء الزجاجي وقاعدة المقطر. والنتائج المتحصل عليها أظهرت تحسناً ملحوظاً في الإنتاجية، حيث وصلت إنتاجيته حوالي $3.16\,kg/m^2$ في الوقت الذي كانت إنتاجية المقطر السطحي التقليدي $2.041\,kg/m^2$، أي بتحسين بنسبة 56%.



شكل (21.6) مقطر مزدوج الأحواض

2.6.6 مقطر شمسي المتدرج

بدلاً من حوض واحد متواصل أقترح مصطفى وآخرون (Moustafa, et al., 1979) استخدام سلم أحواض كالمبين في الشكل (22.6). فكانت إنتاجيته $2.701\,kg/m^2$، كفاءة التشغيل 24%، عند درجة حرارة الجو $33.1\,^{\circ}C$ و شـدة الإشـعاع شمسـي $26.65\,MJ/m^2.day$.

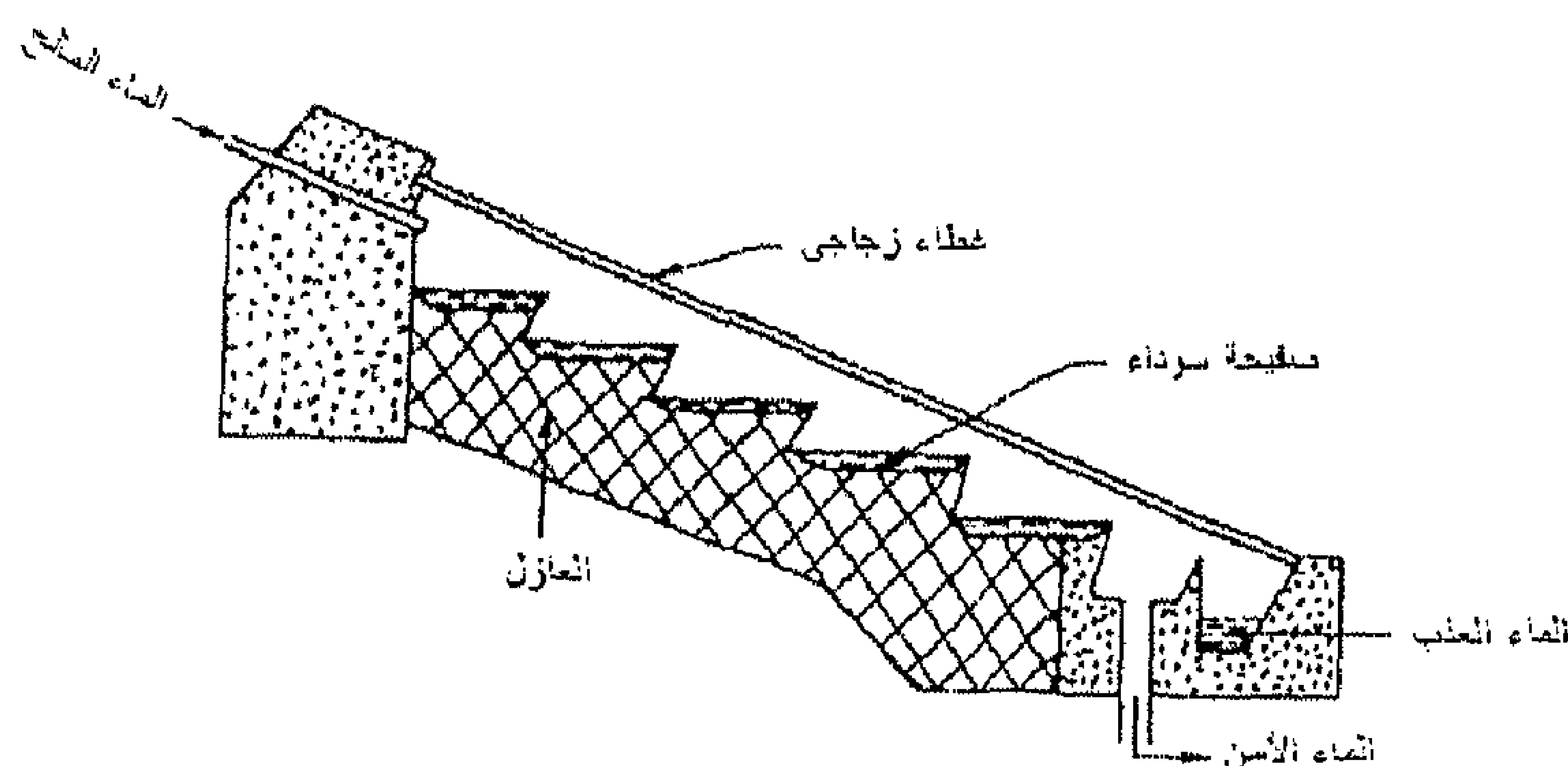


شكل (22.6) مقطر شمسي متدرج

3.6.6 مقطر شمسي متدرج مائل

إن نموذجاً لهذا المقطر مبين في الشكل (23.6). ويتميز هذا المقطـر عـن المقطـر السطحي التقليدي، باستقبال سطح الماء به كمية أكبر من الطاقة الشمسية الساقطة. وطريقة عمله تكمن، بأن يتغذى الحوض العلوي بالمياه المراد تحليتها وتنساب الميـاه الفائضة إلى أسفل إلى الحوض الذي يليه وهكذا. يتكثف الماء المتبخـر علـى سـطح الغطاء الزجاجي المائل ومنه ينساب إلى أسفل ليتجمع بقناة خاصة ومنها إلى خارج

المقطر، كما يتم تصريف المياه الأكثر ملوحة بالحوض السفلي للمقطر للتخلص منها خارج المقطر.



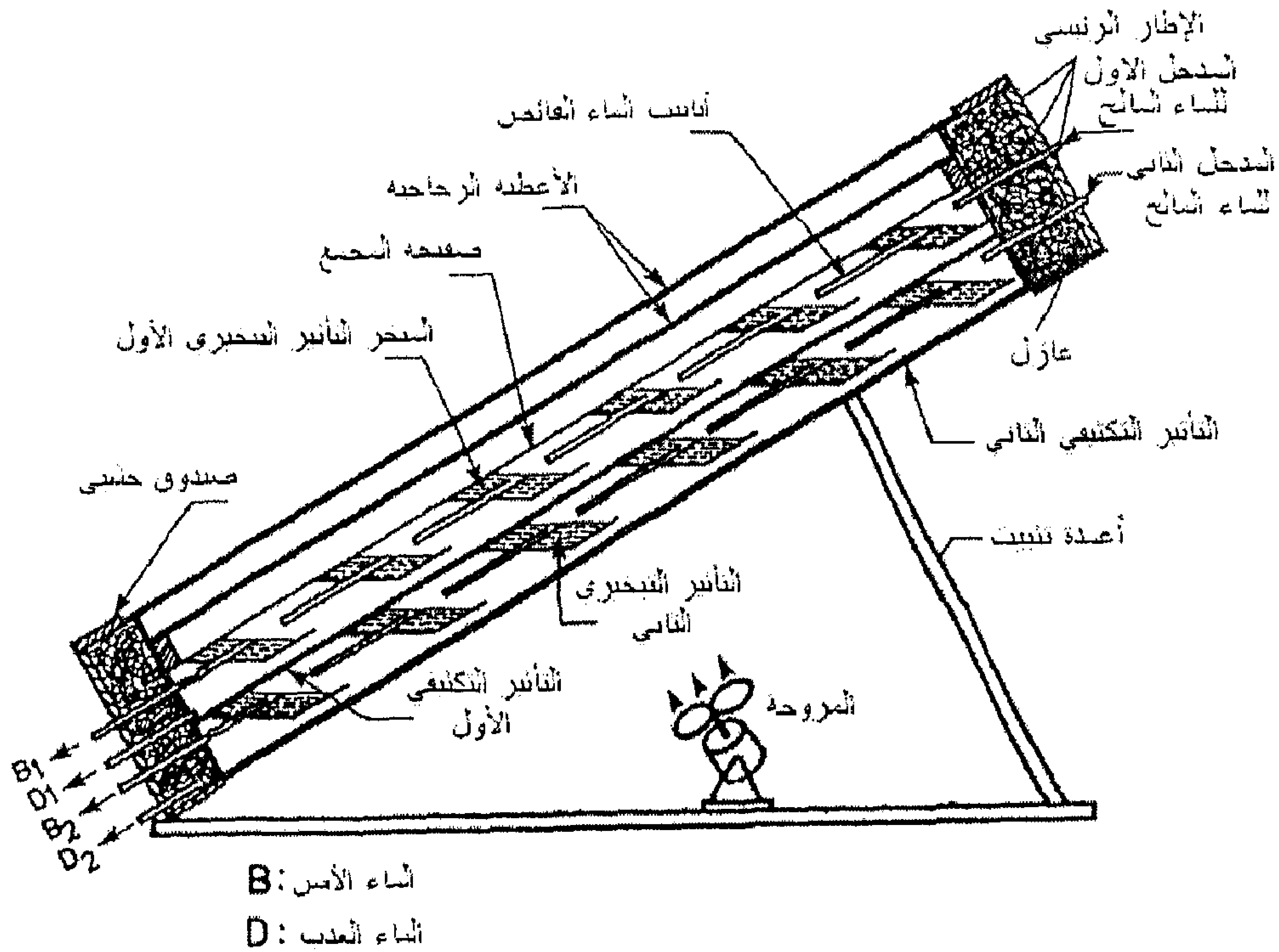
شكل (23.6) مقطر شمسي متدرج مائل

4.6.6 مقطر شمسي مائل متعدد التأثير

الشكل (24.6) يبين مخطط لمقطر شمسي مائل مزدوج التأثير المقترح من قبل (Selcuk, 1964). الجدول (10.6) يوضح مقارنة بين مقطر شمسي سطحي تقليدي والمقطر المائل المزدوج التأثير وذلك باستخدام التبريد القسري (مروحة) أو بالتبريد الطبيعي، وذلك من نتائج التجربة التي أجراها Selcuk.

جدول (10.6) نتائج المقارنة بين أداء مقطر شمسي سطحي تقليدي ومقطر ثنائي التأثير: تبريد باستخدام المروحة، وتبريد طبيعي

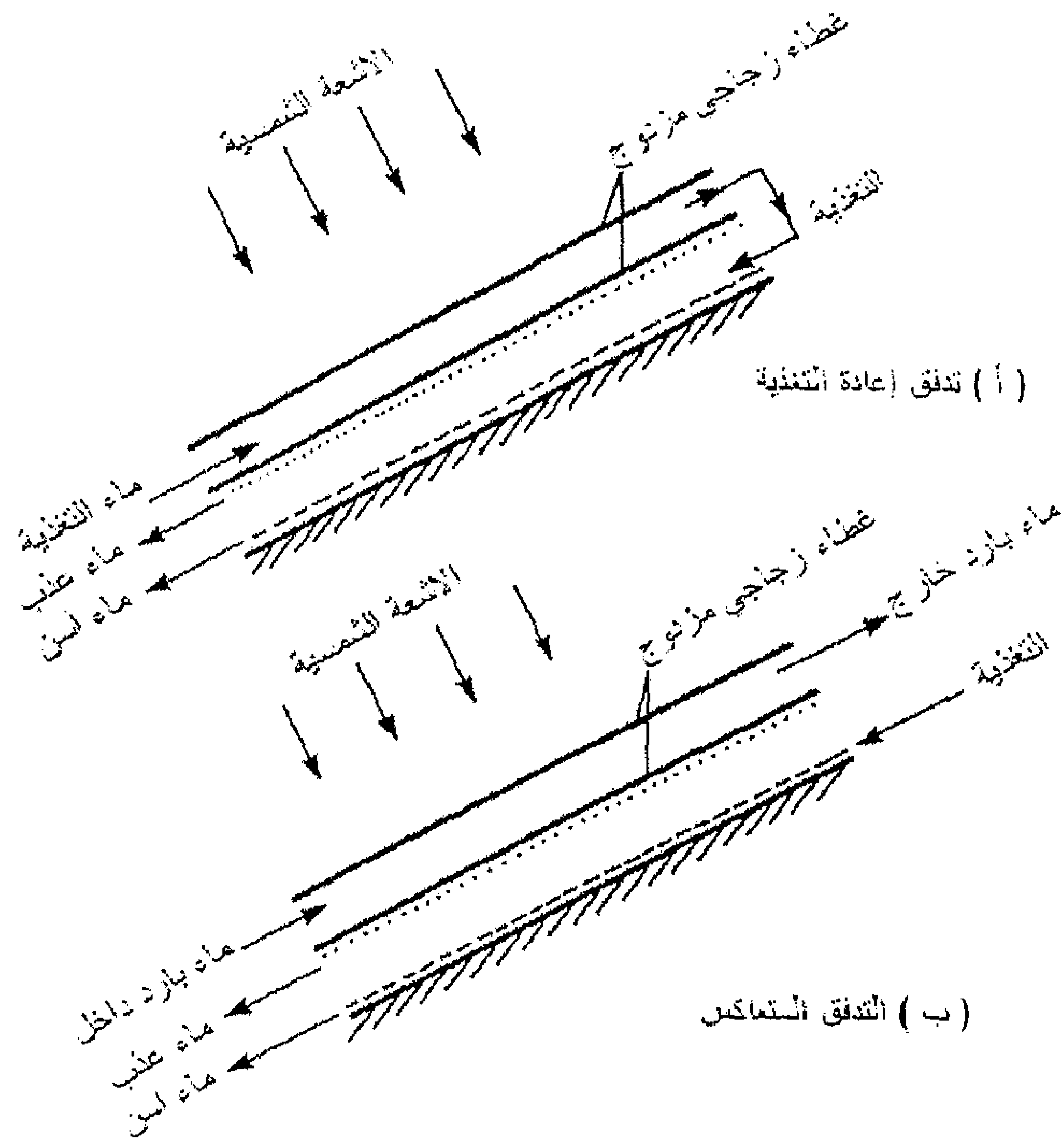
الأداء	الوحدة	مقطر سطحي	مقطر ثنائي التأثير	
			تبريد قسري	تبريد طبيعي
الإشعاع الشمسي اليومي الكلي الأفقي	$\frac{J}{day.m^2}$	2.098×10^7	2.098×10^7	2.041×10^7
الإنتاجية اليومية	$\frac{kg}{day.m^2}$	2.88	4.2	3.37
كفاءة التشغيل	%	31	45	38



شكل (24.6) مقطر شمسي مائل متعدد التأثير

5.6.6 مقطر سطحي بغطاء مبرد

لتحسين أداء المقطر السطحي، أي زيادة إنتاجيته، أقترح (Satcunanathan, et al., 1973)، تبريد الغطاء. تم اقتراح نظامين للتبريد: نظام تدفق إعادة التغذية، ونظام التدفق المتعاكس (كلا النموذجين يستعمل أغطية زجاجية مزدوجة). الشكل (25.6) يبين آلية الطريقتين. والنتائج تبين أن عملية تبريد الغطاء تنتج عنها زيادة في إنتاجية المقطر، وتسخين الماء المالح يكون أكبر في حالة استخدام نظام تدفق إعادة التغذية عنه في نظام التدفق المتعاكس.



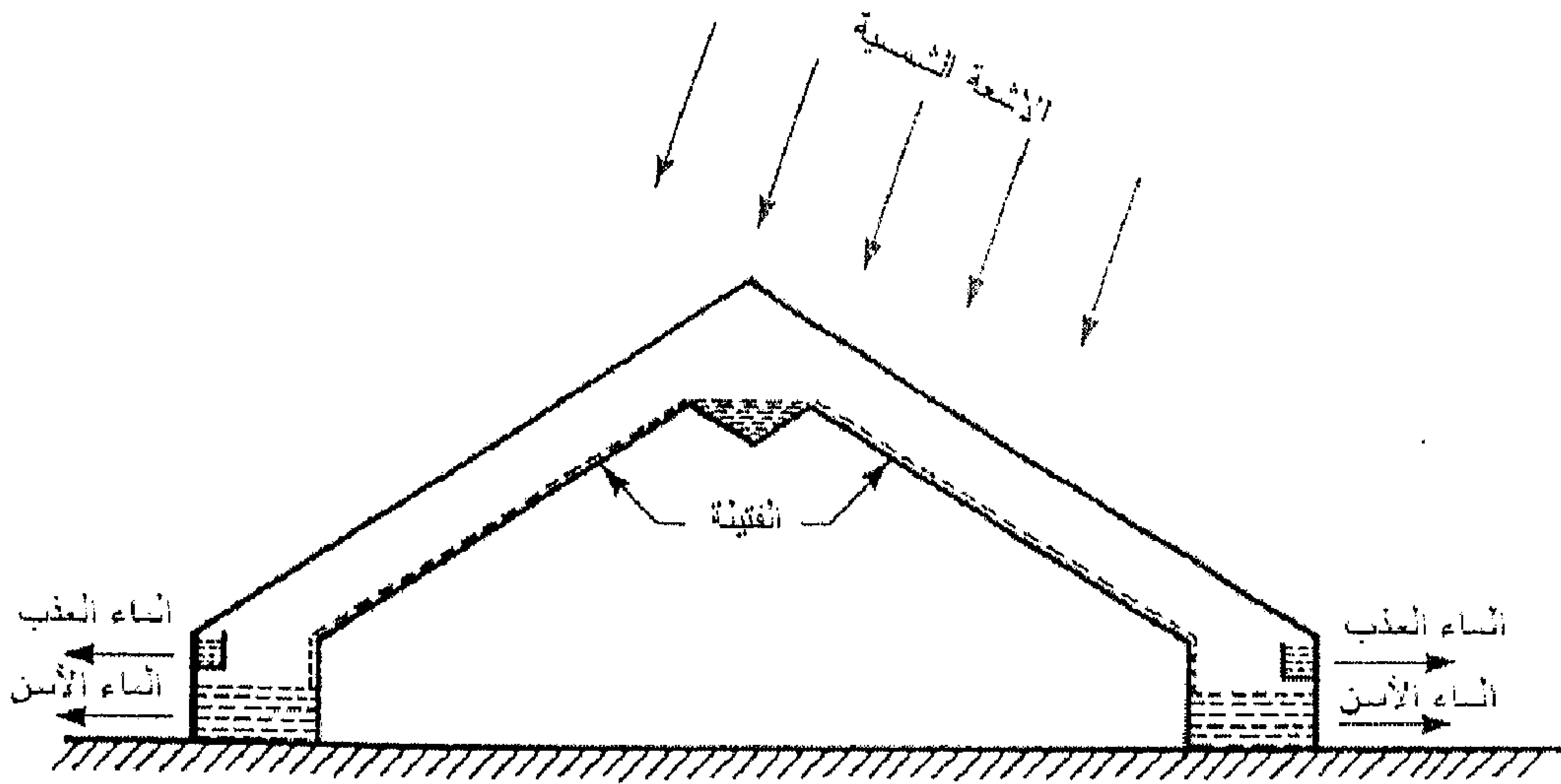
شكل (25.6) مقطر سطحي بغطاء مبرد

6.6.6 مقطر مجمع التبخير (نوع الفتيلة)

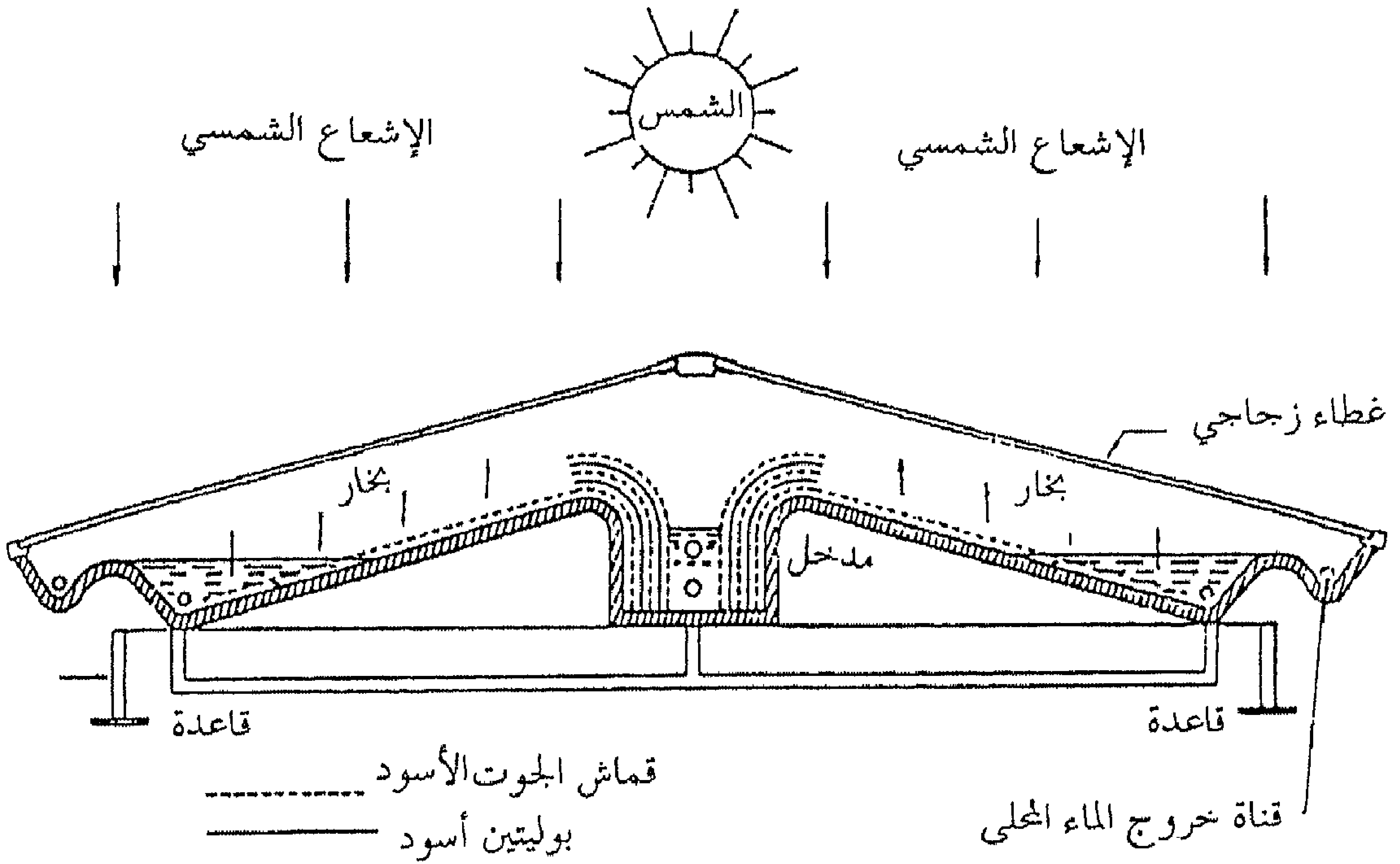
اعتماداً على أن التقليل من عمق المياه المالحة في حوض التبخير في المقطرات الشمسية المسطحة يُحسن من إنتاجية المقطر، توصل (Frick, et al., 1973)، إلى تصميم مجمع التبخير نوع-الفتيلة المبين بالشكل (26.6). وظيفة الفتيلة (قطعة قماش) المحافظة على أن يكون الماء المالح ضحلاً ما أمكن ذلك، وتمنع تكون البقع الملحية الجافة على مساحة التبخير. والنتائج المتحصل عليها باستخدام غطاء زجاجي لمقطر من هذا النوع في مدينة Valparaiso- تشيلي، أعطت معدل إنتاجية يتراوح بين 3.8 إلى 4.4 $kg/m^2.day$ وبكفاءة تشغيل من 40 إلى 46%.

7.6.6 مقطر شمسي متعدد الآطسات (الفتائل)

صمم (Sodha, et al., 1979) مقطر شمسي متعدد الآطسات. والشكل (27.6) يبين مقطع لمقطر شمسي ثنائي الميلان المطور. أما الفتيلة فهي قطعة قماش من نوع إسفنجي مغمورة في الماء والنهاية الأخرى موضوعة في أعلى السطح المائل للمقطر. ولأجل الحصول على طبقة متجانسة من الماء المالح ذات عمق ضحل على السطح المائل للمقطر، فان قطعة القماش السفلية يجب نشرها على كامل طول السطح المائل، بينما القطع الأخرى يُقلل طولها بالتدريج. وعدد قطع القماش المستعملة في المقطر يعتمد على درجة جودة العزل الحراري وطول سطحه المائل.



شكل (26.6) مقطر مجمع التبخير (نوع الفتيلة)



شكل (27.6) مقطر شمسي متعدد الأطسات (الفتائل)

7.6 حساب كلفة إنتاج المياه العذبة من محطات التحلية

يعتبر تقدير كلفة الإنتاج الخطوة الأولى في تحديد الجدوى الاقتصادية لاستخدام المقطرات الشمسية، وذلك لغرض مقارنتها بأرخص البدائل الأخرى للماء العذب. هذا الجزء يقدم حساب كلفة المقطرات الشمسية على طول عمر المحطة.

وبالنسبة لوحدات تحلية المياه، تعتبر التكاليف التالية أهم مركبات حساب التكلفة (المنتصر وآخرون، 2000):

1. التكاليف الكلية الثابتة كنسبة سنوية من رأس المال
2. تكاليف إمداد المحطة بالماء المالح.
3. تكاليف عمال ومراقبة التشغيل.

مجموع هذه المصاريف مقسوماً على الإنتاج السنوي للمحطة إضافة إلى ما قد يتجمع في المحطة من ماء الأمطار، سيكّون كلفة الماء المنتج.

وبهذا، فإن كلفة الماء العذب تُعطى بالمعادلة التالية:

$$C = \frac{10I\left(\overline{IA} + \overline{MR} + \overline{TI}\right) + 1000\left(O.C' + S\right)}{A\left(Y_D + Y_R\right)} \tag{22.6}$$

حيث:

C = كلفة الماء العذب المنتج، (وحدة نقدية لكل m^3)

I = رأس المال المستثمر الكلي، (وحدة نقدية)

$\overline{IA}$ = معدل الفائدة السنوية، (نسبة من رأس المال)

$\overline{MR}$ = المصاريف السنوية، صيانة، تدريب عمال، مواد مستهلكة، (نسبة من رأس المال)

$\overline{TI}$ = المصاريف السنوية، ضرائب وتأمينات، (نسبة من رأس المال)

O = عدد ساعات شغل العمال السنوية، (ساعة لكل عامل)

C' = أجور العمال في الساعة، (وحدة نقدية لكل عامل على الساعة)

S = الكلفة الكلية (الثابتة والتشغيل)، لتزويد المحطة بالماء المالح، (وحدة نقدية)

A = مساحة المقطر، (m^2)

Y_D = إنتاجية الماء العذب في السنة، (kg/m^2)

Y_R = كمية مياه الأمطار المتجمعة في المحطة في السنة، (kg/m^2)

المراجع

1. محمد المنتصر، محمد فتحي بارة، غسان صبحي المصري، *المؤتمر والمعرض الدولي للطاقة وتحلية المياه*، طرابلس - ليبيا، 180 (2000). "اقتصاديات المقطرات الشمسية بالمناطق النائية".
2. خيري أغا، محمد سبيطة، هاني فتيتة، *كتاب أبحاث الندوة العلمية حول الطاقة الشمسية*، مايو 25-26 براك الشاطئ - ليبيا، 138 (1999). "تقنيات وحدة تحلية مياه البحر تعمل بالبرك الشمسية- خبرة مشروع تجريبي بتاجوراء."
3. Abu-Jabal, M.S., Kamiya, I., *Desalination*, **137**, 1 (2001). "Proving Test for a Solar-Powered Desalination System in Gaza-Palestine."
4. Al Mountaser, M. and Bara, M., *Symposium about Solar Energy*, Brack-Libya, 39 (1999). "Solar Energy and Water Desalination".
5. Baibutaev, K. B., Achilov, B. M. and Kamaeva, G., *Applied Solar Energy (Geliotekhnika)*, **6**, 83 (1970)."Effect of Salt Concentration on the Evaporation Process in Solar Stills".
6. Bloemer, J. W., *ASME*, **65-WA/SOL-1**, 8 (1965)."Factors Affecting Solar-Still Performance".
7. Bloemer, J. W., Eibling, J. A., Irwin, J. R. and Lof, G. O. G., *Solar Energy*, **9**, 197 (1965)."A Practical Basin-Type Solar Still".
8. Caruso, G., Naviglio, A., *Desalination*, **122**, 225 (1999). "A Desalination Plant Using Solar Heat as a Heat Supply, not Affecting the Environment with Chemicals."
9. Cooper, P. I., *Solar Energy*, **12**, 313 (1969)."Digital Simulation of Transient Solar Still Processes".
10. Cooper, P. I., *Solar Energy*, **15**, 205 (1973)."The Maximum Efficiency of Single-Effect Solar Stills".

11. Delyannis A. and Delyannis E., *Pro. 4th Int. Symp. on Fresh Water from Sea*, **4**, 487 (1973). "Solar distillation plant of high capacity".

12. Delyannis, E.E., *Desalination*, **67**, 3 (1987). "Status of Solar Assisted Desalination: a Review."

13. Delyannis, E., *Solar Energy*, **75**, 357 (2003). "Historic Background of Desalination and Renewable Energies."

14. Desalination Guide Using Renewable Energies, 1998, THERMIE Programme, CRES, Greece, ISBN 960-90557-5-3.

15. Dunkle, R.V., *The Proceedings of the International Heat Transfer Conference*, University of Colorado, USA, **5**, 895 (1961). "Solar Desalination: The Roof-Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still."

16. El-Nashar, A.M., *Desalination*, **52**, 217 (1985). "Abu Dhabi Solar Distillation Plant."

17. El-Nashar, A.M., *Desalination*, **93**, 597 (1993). "An Optimal Design of a Solar Desalination Plant."

18. Elsayed, M.M, Taha, I.S., Sabbagh, J.A., *Design of Solar Thermal Systems*, Scientific Publishing Center, King Abdulaziz University, Jeddah- Saudi Arabia Kingdom, (1984).

19. European Commission, *Desalination Guide Using Renewable Energies*, (1998).

20. Frick, G., Sommerfeld, J.V., *Solar Energy*, **14**, 427 (1973). "Solar Stills of Inclined Evaporating Cloth."

21. Garg, H. P. and Mann, H. S., *Solar Energy*, **18**, 159 (1976)."Effect of Climatic, Operational and Design Parameters on the Year Round Performance of Single Sloped and Double Sloped Solar Still Under Indian and Arid Zone Conditions".

22. Garg, H. P., *First Exposition & Symposium for New & Renewable Energy Equipment*, Tripoli-Libya, 1 (1991)."Solar Desalination Technique".

23. Hanafi, A., *Desalination*, **82**, 165 (1991). "Design and Performance of Solar MSF Desalination System."

24. Kreith, F., Kreider, J.F., *Principles of Solar Engineering*, Hemisphere Publishing Corporation, USA, (1978).

25. Kreith, F. and Luft, W., *Proceedings of Solar Desalination Workshop*, **1**, 13 (1981)."An Overview of Solar Desalination Technologies".

26. Lof, G. O. G., *U.N. Conference on New Sources of Energy*, **Paper 35/S/77**, Rome, (1961)."Application of Theoretical principles in Improving the Performance of Basin-Type Solar Distillers".

27. Madani, A.A., *Desalination*, **78**, 187 (1990). "Economics of Desalination Systems."

28. Malik, M.A.S, Tiwari, G.N., Kumar, A., Sodha, M.S., *Solar Distillation*, Progamon Press Ltd., UK, (1982).

29. Manjares, R., Galvan, M., *Desalination*, **31**, 545 (1979). "Solar Multistage Flash Evaporation (SMSF) as a Solar Energy Application on Desalination Processes. Description of One Demonstration Project."

30. McAdams, W.H., *Heat Transmission*, McGraw-Hill Book Company, (1954).

31. Morse, R. N. and Read, W. R., *Solar Energy*, **12**, 5 (1968)."A Rational Basis for the Engineering Development of a Solar Still".

32. Morse, R. N., *Desalination*, **5**, 82 (1968)."The Construction and Installation of Solar Stills in Australia".

33. Morse, R. N., Read, W. R. and Trayford, R. S., *Solar Energy Society Annual Meeting,* Palo Alto, California, (1968)."Operating Experiences with Solar Stills for Water Supply in Australia".

34. Moustafa, S.M.A., Brusewitz, G.H., Farmer, D.M., *Solar Energy*, **22**, 141 (1979). "Direct Use of Solar Energy for Water Desalination."

35. Nassar, Y. F. and Salem, A. A., *Dubai International Conference on Water*, Dubai, 185 (2002)."Progression of Solar Desalination Systems (Arabic Experience)".

36. Nayak, J.K., Tiwari, G.N., Sodha, M.S., *Int. J. of Energy Research*, **4**, 41 (1980). "Periodic Theory of Solar Still.

37. "Nebbia, G. and Menozzi, G., *Acque Dolce Dal Mare, II Inchiesta Internaziono. In: Proceedings of International Symposium, Milano*, 129 (1966). "A Short History of Water Desalination".

38. Palma, F., *Seminar on New Technologies for the Use of Renewable Energies in Water Desalination.* Athens, (1991).

39. Riera, J., Martinez-Lozano, J. A., Tejerina, F. and Tena-Sanguesa, F., *Solar Energy International Progress*, vol. 3, 1474 (1978)."Efficiency of a Solar Still as a Function of its Main Parameters".

40. Safi, M.J., *Renewable Energy*, **14**, 339 (1998). "Performance of a Flash Desalination Unit Intended to be Coupled to a Solar Pond."

41. Satcunanathan, S. and Hansen, H. P., *Solar Energy*, **14**, 353 (1973). "An Investigation of Some of the Parameters Involved in Solar Distillation".

42. Selcuk, M.K., *Solar Energy*, **8**, 23 (1964). "A Multiple-Effect Tilted Solar Distillation Unit."

43. Sodha, M.S., Tiwari, G.N., *Solar and Wind Technology*, **6**, 653 (1979). "Demonstration Plants of FRP Multi-Wick Solar Still: An Experimental Study."

44. Sodha, M.S., Nayak, J.K., Tiwari, G.N., Kumar, A., *Energy conservation and Management*, **20**, 23 (1980). "Double Basin Solar Still."

45. Soliman, S. H., *Solar Energy*, **13**, 403 (1972)."Effect of Wind on Solar Distillation".

46. Spiegler, K. S., Priciples of Desalination, 3[th] edition, 13,(1969), Academic Press, Inc., U.S.A., 1[st] chapter, "Desalination Research and Water Resources", by, Gillam, W. S. and McCoy, W. H.

47. Szagsvay, T., Hofer-Noser, P., Posnansky, M., *Desalination*, **122**, 185 (1999). "Technical and Economic Aspects of Small-Scale Solar Pond-Powered Sea Water Desalination Systems."

48. Tzen, E. and Morris, R., *Solar Energy*, **75**, 375 (2003). "Renewable Energy Sources for Desalination".

49. Zarza Moya, E., Secretaria General Tecnicadel, CIEMAT, Madrid, (1991). "Solar Thermal Project: First Phase and Results and Second Phase Description."

الفصل السابع

التبريد، التكييف والتهوية

1.7 مقدمة

أبدى الباحثون الكثير من الاهتمام لتطبيقات الطاقة الشمسية في مجال التبريد وتكييف الهواء في السنوات الأخيرة. ولعل السبب يعود إلى ملائمة هذه التطبيقات مع الاختلاف الفصلي للطاقة الشمسية، حيث يصل حمل التبريد إلى قيمته العظمى في الوقت نفسه الذي تكون فيه الطاقة الشمسية عند أعلى مستوى لها. مبدئياً يمكن تحويل الأشعة الكهرومغناطيسية الشمسية إلى طاقة كهربائية (عن طريق الخلايا الكهروضوئية) أو إلى طاقة حرارية (عن طريق المجمعات الشمسية)، واستخدام تلك الطاقة لتشغيل أجهزة التبريد. المشكلة الأساسية تكمن في اقتصاديات عملية تحويل الطاقة. طريقة أخرى لإنتاج تأثير تبريدي باستخدام أنظمة تبريد غير ميكانيكية (بدون ضاغط) كأنظمة الامتصاص والتي تبدو جذابة من وجهة النظر الاقتصادية.

وتتكون أنظمة التبريد الشمسية بصورة عامة من جزئيين رئيسيين هما: جهاز التبريد ومصدر الطاقة الحرارية. هناك العديد من أنظمة التبريد مثل نظام الامتزاز، الامتصاص، إزالة الرطوبة، النفاث الطارد، التبريد الإشعاعي.

نظام التبريد الامتصاصي الشمسي أصبح من البدائل المفضلة، وذلك للأسباب التالية: أولاً: أنها تستخدم الطاقة الحرارية الشمسية مباشرة بدون الحاجة إلى نظام تحويل الطاقة إلى طاقة ميكانيكية كتلك التي في أنظمة ضغط البخار. ثانياً: أنها تستخدم موائع كالماء والأمونيا والتي لا تؤثر على انحسار طبقة الأزون، وهذا يطابق اتفاقية مونتريال. ثالثاً: الموائع المستخدمة ليس لها تأثير الاحتباس الحراري والأمر الذي يتناسب مع متطلبات معاهدة كيوتو Kyoto.

الخصائص الديناميكاحرارية للعديد من دورات التبريد مدرجة في المراجع العلمية المتخصصة، على سبيل المثال، (سالم، جيجان، 2002). وهذا الفصل يقدم المبادئ الأساسية والتحليل الرياضي لدورات التبريد الامتصاصي، معتمدين بصورة كبيرة على ما ورد في المراجع الخاصة بالطاقة الشمسية ومن بينها، (Elsayed et al, 1984).

2.7 دورة التبريد الامتصاصية

يعتبر نظام التبريد الامتصاصي من أقدم أنواع أنظمة التبريد المنتجة للتأثير التبريدي، وكانت أول ثلاجة تبريد تعمل بنظام التبريد الامتصاصي من اختراع الفرنسي فيرديناند كيرسة عام 1860. ويمكن استخدام هذا النظام في محطات التبريد الصناعية والتطبيقات الكبيرة. وموائع التبريد الشائعة الاستخدام في هذه الأنظمة هي الأمونيا والماء. ويستخدم نظام التبريد الامتصاصي الطاقة الحرارية بدلاً من الطاقة الميكانيكية كما في نظام التبريد بالضغط التبخيري. وفي نظام التبريد الامتصاصي نجد أن وعاء الامتصاص ومضخة ومولد بدلاً من الضاغط، هذه الأجزاء الثلاثة تؤدي نفس وظيفة الضاغط في نظام التبريد بالضغط التبخيري.

1.2.7 وصف دورة تبريد امتصاصية بسيطة

يبين الشكل (1.7) منظومة تبريد امتصاصية بسسيطة، تتكون من الأجزاء التالية: وعاء امتصاص، مولد، مكثف، مبخر، مضخة وصمامي تمدد. والمائع العامل عبارة عن محلول من مائع تبريد ومائع ماص. يحضر المحلول بدرجة تركيز معينة في جهاز الامتصاص. تعمل الدورة عند ضغطين: ضغط المولد ـ المكثف P_2 وضغط الماص ـ المبخر P_1. تقوم المضخة بسحب المحلول من النقطة **1** بضغط P_1 ودفعه بمعدل $\dot{M}$ إلى المولد بضغط P_2 والذي تتم فيه عملية تسخين المحلول

بواسطة إضافة حرارة بمعدل q_g. تتغير تبعاً لذلك حالة المحلول الابتدائية ويبدأ الغليان. نتيجة للغليان والذي يتم عند ضغط ثابت مع تغير مستمر في تركيز المحلول، يتشكل مزيج بخاري مؤلف من بخار مائع التبريد وبخار المائع الماص بمعدل $\dot{m}$ حيث يكون تركيز مائع التبريد في المزيج البخاري في النقطة 5 أكبر من تركيزه في المحلول العائد إلى الماص في النقطة 4. يتمدد مائع التبريد من الحالة 6 إلى الحالة 7 بفعل صمام التمدد إلى ضغط المبخر P_1، وتتم عملية التمدد تلك بثبوت كلٍ من الانثالبي h ودرجة التركيز x. بعد ذلك يدخل مائع التبريد إلى المبخر ليمتص حمل التبريد ويتبخر بثبات الضغط ويتحول من الحالة 7 إلى الحالة 8 مسبباً تأثير تبريدي مقداره q_e. يدخل البخار المتكون في المبخر الحالة 8 إلى وعاء الامتصاص وكذلك بالنسبة للمحلول المنخفض التركيز القادم من المولد والذي يتمدد خلال صمام التمدد الثاني إلى الضغط P_1. وتتم في جهاز الامتصاص عملية امتصاص بخار مائع التبريد القادم من المبخر 8 من قبل المحلول المنخفض التركيز القادم من صمام التمدد الثاني 4 وينتج مزيج ويأخذ تركيز المحلول بالارتفاع حتى يصل في النهاية إلى تركيز البداية النقطة 1، وينتج من عملية الامتصاص تكثف بخار مائع التبريد ويتم طرح الحرارة إلى الوسط الخارجي بمعدل q_a. بعد الانتهاء من عملية الامتصاص، ويتم ضخ المحلول بواسطة المضخة إلى المولد لإعادة الدورة ثانية.

2.2.7 المفاهيم الحرارية لدورة تبريد امتصاصية بسيطة

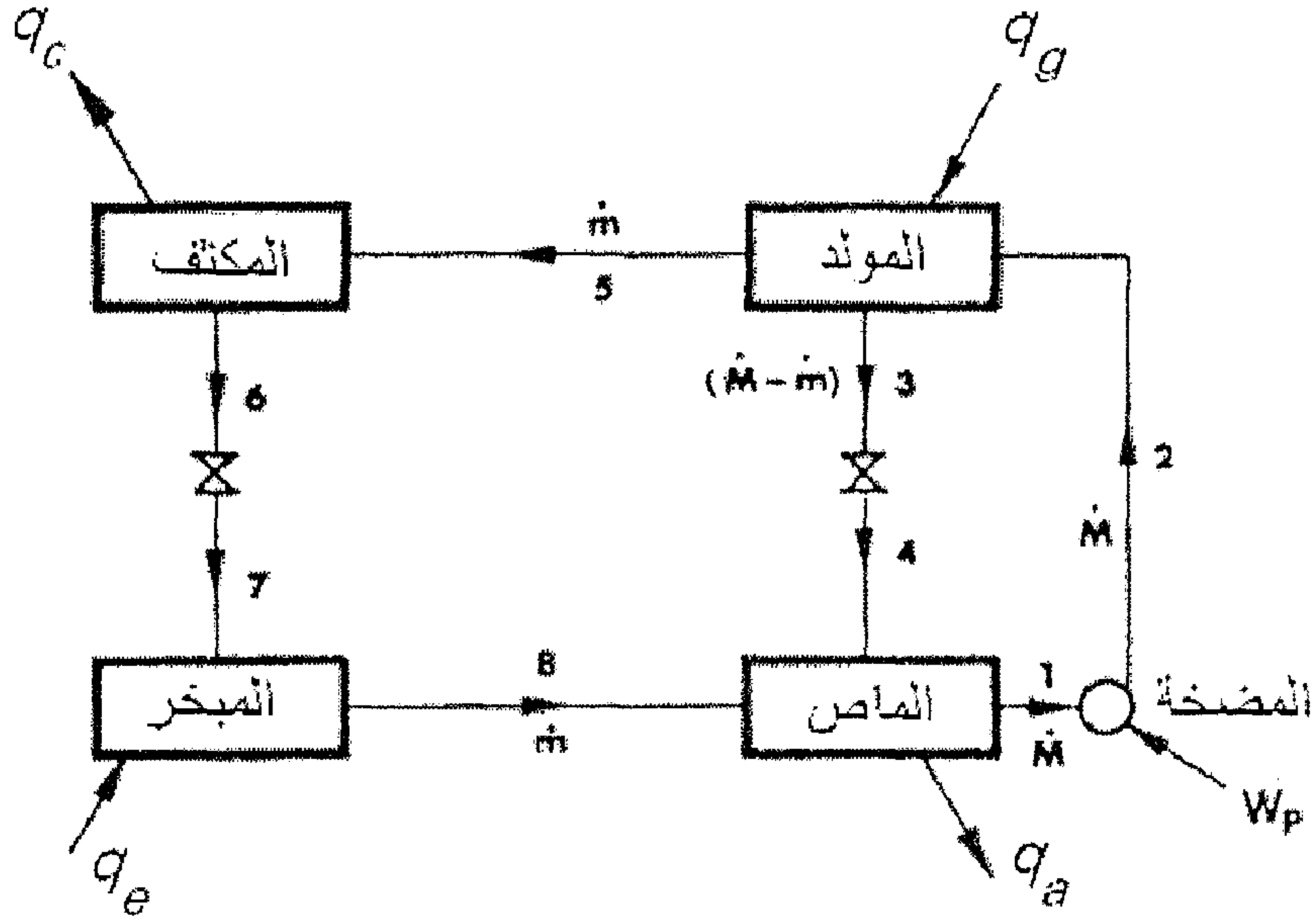
لظروف الحالة المستقرة، وبتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية على جميع أجزاء الدورة، ينتج:

$$q_g = \left(\dot{M} - \dot{m}\right)h_3 + \dot{m}\,h_5 - \dot{M}\,h_2 \qquad (1.7)$$

$$q_a = \left(\dot{M} - \dot{m}\right)h_4 + \dot{m}\,h_8 - \dot{M}\,h_1 \qquad (2.7)$$

$$q_c = \dot{m}(h_5 - h_6) \quad (3.7)$$

$$q_e = \dot{m}(h_8 - h_7) \quad (4.7)$$



شكل (1.7) نظام تبريد امتصاصي أساسي

ويكون الشغل المطلوب من المضخة W_p لرفع تدفق كتلة $\dot{M}$ بكثافة ρ_1 من ضغط P_1 إلى ضغط P_2:

$$W_p = \frac{\dot{M}}{\rho_1}(P_2 - P_1) \quad (5.7)$$

يعرف التركيز x، على أنه نسبة وزن مائع التبريد إلى وزن المحلول، وبتطبيق موازنة التركيز على المولد نحصل على:

$$x_2 \dot{M} = x_3(\dot{M} - \dot{m}) + x_5 \dot{m}$$

$$\frac{\dot{M}}{\dot{m}} = \frac{x_5 - x_3}{x_2 - x_3} = R \quad (6.7)$$

حيث R، تمثل معامل تدوير المحلول.

وفي نظام التبريد الامتصاصي، يكـون التـأثير التبريـدي الكلـي هـو الحـرارة الممتصة بواسطة مائع التبريد في المبخر q_e، والطاقة الكلية المجهزة للنظام وتتمثل في مجموع الشغل المنجز بواسطة المضخة W_p، والحرارة المجهزة في المولد q_g، ولذا فإن معمل أداء COP، هذا النظام يُعطى بالمعادلة التالية:

$$COP = \frac{q_e}{W_p + q_g} \tag{7.7}$$

ولأن قيمة W_p أصغر بكثير من قيمة q_g، فإن المعادلة السابقة يمكن أن تُختصر إلى الصورة التالية:

$$COP = \frac{q_e}{q_g}$$

$$= \frac{\dot{m}(h_8 - h_7)}{(\dot{M} - \dot{m})h_3 + \dot{m}h_5 - \dot{M}\,h_2}$$

$$= \frac{(h_8 - h_7)}{R(h_3 - h_2) + (h_5 - h_3)} \tag{8.7}$$

3.2.7 خصائص المحلول العامل في دورات التبريد الامتصاصية

إن تركيبة محلول مائع التبريد والمائع الماص العامل في نظام التبريد الامتصاصي يجب أن يتوفر فيه الخصائص التالية:

1. عدم ظهور الحالة الصلبة في المائع الماص.
2. مائع التبريد يجب أن يكون متطايراً أكثر من المائع المـاص حتـى تحـدث عمليـة الفصل في المولد بسهولة.
3. المائع الماص يجب أن يكون قليل الانجذاب إلى مائع التبريد.

4. درجة عالية من الاستقرارية لفترة تشغيل طويلة.
5. يجب أن يكون مائع التبريد ذو حرارة كامنة كبيرة حتى يتسنى له الحفاظ على معدل تدوير منخفض.
6. معدل تآكل منخفض وغير سام وذلك لأسباب أمنية.
7. امتصاص سريع لمائع التبريد بواسطة المائع الماص.
8. لزوجة منخفضة للمحلول تحت ظروف التشغيل.
9. يجب أن تكون درجة تجمد المحلول أقل من أصغر درجة حرارة في الدورة.

يوجد العديد من موائع التبريد ـ الامتصاص المطابقة للشروط السابقة. ويبين جدول (1.7) بعضاً من تلك المحاليل. ومن المحاليل الأكثر شيوعاً المدرجة في الجدول (1.7) محلول الماء ـ بروميد الليثيوم (H_2O-LiBr) ومحلول الأمونيا ـ الماء (NH_3-H_2O). والخواص الحرارية لمحلول (H_2O-LiBr) مبينة في الأشكال (2.7)، (3.7). وكذلك بالنسبة لمحلول (NH_3-H_2O) في الشكل (4.7). الخواص الحرارية لبقية المحاليل مدرجة في، (Ferreira, 1984).

جدول (1.7) تراكيب بعض المحاليل العاملة في أنظمة التبريد الامتصاصية

مائع التبريد	المائع الماص	الصيغة الكيمائية
ماء	بروميد الليثيوم	H_2O-LiBr
أمونيا	ماء	NH_3-H_2O
أمونيا	نيوكوانات الصوديوم	NH_3-NaSCN
أمونيا	نترات الليثيوم	NH_3-$LiNO_3$
أمونيا	كلوريد الكالسيوم	NH_3-$CaCl_2$
R21	اثير الجليكول	–

4.2.7 أسس اختيار المائع العامل لدورة تبريد امتصاصية تعمل على الطاقة الشمسية

في الفقرة السابقة تم التعرف على الخصائص العامة المفضلة لمحلول التبريد - الماص لمنظومة تبريد امتصاصية، وقائمة المحاليل التي تتطابق مع تلك المواصفات المدرجة في الجدول (1.7). السؤال الآن هو: أي من هذه الموائع يمكن استخدامه كمائع عامل لمنظومة تبريد امتصاصية تعمل على الطاقة الشمسية ؟ الجواب يعتمد على ظروف التشغيل والتي تكمن في: درجة حرارة المجمع الشمسي المنقولة إلى المولد T_g، درجة حرارة التبريد T_e، ودرجة حرارة الوسط المحيط T_o. قيم T_g تتراوح من القيم المنخفضة المتوفرة لدى المجمعات الشمسية المستوية إلى القيم المرتفعة عند المركزات. وأيضاً، فقيم T_e تتغير من القيم المنخفضة في تطبيقات المبردات إلى القيم المرتفعة في تطبيقات تكييف الهواء.

قائمة بالخواص الحرارية المؤثرة في أداء منظومات التبريد الامتصاصية العاملة على الطاقة الشمسية مدرجة أسفله، وبالتالي يجب أن تُستخدم لاختيار مائع التبريد المناسب لمثل تلك المنظومات. هذه الخواص هي:

1. القيم الكبيرة لمعامل أداء الدورة COP.
2. أقل معامل تدوير المحلول R.
3. أقل نسبة شغل ضخ لكل طن حمل تبريد W_p/q_e.

على هذا الأساس قام (Mansoori et al, 1979)، بمقارنة كلاً من المحاليل التالية: H_2O-LiBr، NH_3-H_2O، NH_3-NaSCN، وكانت النتيجة كالتالي:

1. H_2O-LiBr كان أفضل مائع تبريد عند درجات حرارة وسط T_o عالية، يليه NH_3-NaSCN، ثم NH_3-H_2O.
2. NH_3-NaSCN كان أفضل مائع تبريد عند درجات حرارة وسط T_o منخفضة، حيث H_2O-LiBr لم يعمل البتة.

3. الزيادة في COP أكثر حساسية لدرجة حرارة المولد T_g في H_2O-LiBr عنه في المحاليل الأخرى.
4. معامل التدوير R كان الأقل عند NH_3-H_2O ويتبعه NH_3-NaSCN ثـم عنـد H_2O-LiBr.
5. النسبة W_p/q_e كانت أقل ما يكون عند H_2O-LiBr يتبعه NH_3-NaSCN ثم عند NH_3-H_2O.

تم دراسة واختبار منظومات التبريد الامتصاصية العاملة بالمحاليل H_2O-LiBr، NH_3-H_2O، ونتيجة الدراسة كانت كالتالي:

1. نظام H_2O-LiBr أبسط تصميماً من NH_3-H_2O.
2. عند نفس درجة حرارة المولد T_g وظروف التشغيل، نظام H_2O-LiBr أبـدى COP أكبر من نظام NH_3-H_2O.
3. احتمالية حدوث التبلور في نظام H_2O-LiBr عند مدخل جهاز الامتصاص إذا وصل التركيز إلى حد التبلور، ويعتبر هذا عيباً في النظام.
4. من عيوب نظام NH_3-H_2O بأن له ضغط كبير في المكثف وبالتالي سيكون هذا النظام بحاجة إلى مكثف ثقيل لتحمل الضغط مما سيزيد من كلفة النظام.
5. يمكن تشغيل نظام H_2O-LiBr باستخدام المجمعـات الشمسـية المسـتوية، بينمـا يشتغل نظـام NH_3-H_2O علـى درجـات حـرارة عاليـة والـتي يمكـن تجهيزهـا باستخدام المركزات.
6. نسبة ضغط نظام NH_3-H_2O أكبر منـه في نظـام H_2O-LiBr، وبالتـالي يكـون النظام الأول بحاجة إلى قدرة ضخ أكبر منه في النظام الثاني.
7. يحظر استخدام نظام NH_3-H_2O في المنشآت السكنية وذلك خوفـاً مـن الخطـر المصاحب لتسرب غاز الأمونيا.

5.2.7 تحسين أداء منظومات التبريد الامتصاصية

تم اقتراح الكثير من التعديلات لتحسين أداء منظومات التبريد الامتصاصية الشمسية وجعلها أكثر اقتصادية. تشتمل هذه التعديلات على إضافة خزانات حرارية وخزانات تبريد وخزانات لحفظ محلول التبريد ومبادلات حرارية. أبسط هذه المكونات هي التي تتضمن مجمعات شمسية، حيث يمكن دمج المولد والمجمع في تركيبة واحدة لتخفيض فواقد النقل الناتجة من الاحتكاك في الأنابيب. من عيوب النظام السابق عمله خلال فترة النهار فقط. وللتغلب على هذا العجز تم إضافة خزان حراري لتخزين الحرارة نهاراً لاستخدامها ليلاً. وتعتبر الخزانات المائية الأكثر استخداماً، وذلك لقلة تكلفتها وارتفاع الحرارة النوعية للماء. ولتحسين ظروف تشغيل نظام التبريد الامتصاصي الشمسي وجعله يعمل لفترات زمنية أطول، تم الاستعانة بخزان تبريد، والذي يستخدم لتخزين كمية من السعة التبريدية والتي تفوق حمل التبريد اللحظي، ثم يتم سحب حمل التبريد من الخزان حسب الطلب. وخزان التبريد هذا يضمن استمرارية عمل النظام بدون انقطاع ويحسن من معامل الأداء. وقد يستخدم أكثر من خزان تبريد واحد في بعض التطبيقات.

3.7 تقييم نظام تبريد امتصاصي يعمل بالطاقة الشمسية

1.3.7 معامل النسبة الحرارية

يعرف معامل النسبة الحرارية (STR) بأنه، النسبة بين التأثير التبريدي، q_e ، إلى الطاقة الشمسية الساقطة على المجمعات الشمسية، H_t ، أي أن:

$$STR = \frac{q_e}{H_t} \quad (8.7)$$

$$= \frac{q_e}{q_g} . \frac{q_g}{H_t} = COP.\eta_{col} \quad (9.7)$$

حيث: η_{col} ، تمثل كفاءة المجمعات الشمسية.

يُستخدم معامل النسبة الحرارية لمنظومة تبريد تعمل بالطاقة الشمسية، لمقارنة هذه المنظومة مع المنظومات الأخرى والتي تعمل تحت نفس الظروف.

2.3.7 المساحة النوعية للمجمعات الشمسية

في الفقرة السابقة تم تعريف *STR*، وتستخدم قيمته كحكم لأداء النظام ولإعطاء مؤشر على تكلفة التشغيل للنظام. النظام بقيم *STR*، عالية ليس بالضرورة أن يكون مناسباً اقتصادياً. وكلفة رأس المال لنظام تبريد شمسي، تتمثل في مجموع تكاليف أجزاء النظام. وكلفة المجمعات الشمسية تمثل قيمة كبيرة من الكلفة الكلية للنظام. وما يُسمى بالمساحة النوعية للمجمعات، عبارة عن مؤشر، والذي يمكن من خلاله الحكم بصورة تقريبية عن تكلفة رأس المال لمنظومة التبريد الشمسية. وتُعرف المساحة النوعية للمجمعات الشمسية على أنها، مساحة المجمعات الشمسية المطلوبة لإنتاج وحدة تبريد خلال فترة تشغيل المنظومة يوماً واحداً. في الجدول (2.7)، أُدرجت قيم مختلفة للمساحة النوعية للمجمعات الشمسية.

جدول (2.7) قيم المساحة النوعية للمجمعات الشمسية لأنظمة تبريد شمسية مختلفة

المصدر	المساحة النوعية، $m^2/kWh.day$
(Asher and Reti, 1961)	0.6 ← 0.54
(Lof, 1963)	0.4 ← 0.3
(Duffie and Sheridan, 1965)	0.67 ← 0.37
(Farber, 1970)	0.66

3.3.7 محاكاة نظام تبريد H_2O-LiBr

ترمز الأعداد اللاتينية I إلى V إلى المولد، الماص، المكثف، المبخر والمبادل الحراري، على التوالي. وبالإشارة إلى تركيز البروميد الليثيوم في المحلول بالرمز x، فان المعادلات الحاكمة للتبادل الحراري في الأجزاء الخمسة هي:

$$F_I = (U\,A)_I\,\theta_{m,I} - M_3\,(h_7 - h_3) - \frac{x_1}{x_4} M_3\,(h_4 - h_7) = 0 \tag{10.7}$$

$$F_{II} = (U\,A)_{II}\,\theta_{m,II} - M_1\,(h_{10} - h_1) - \frac{x_1}{x_4} M_1\,(h_6 - h_{10}) = 0 \tag{11.7}$$

$$F_{III} = (U\,A)_{III}\,\theta_{m,III} - M_7\,(h_7 - h_8) = 0 \tag{12.7}$$

$$F_{IV} = (U\,A)_{IV}\,\theta_{m,IV} - M_9\,(h_{10} - h_9) = 0 \tag{13.7}$$

$$F_V = (U\,A)_V\,\theta_{m,V} - M_4\,(h_4 - h_5) = 0 \tag{14.7}$$

$$T_{26} = T_{25} - \frac{M_3}{M_{25}\,Cp_{25}}(h_7 - h_3) - \frac{x_1}{x_4}\frac{M_3}{M_{25}\,Cp_{25}}(h_4 - h_7) \tag{15.7}$$

$$T_{35} = T_{32} + \frac{M_1}{M_{32}\,Cp_{32}}(h_{10} - h_1) + \frac{x_1}{x_4}\frac{M_1}{M_{32}\,Cp_{32}}(h_6 - h_{10}) \tag{16.7}$$

$$T_{34} = T_{33} + \frac{M_7}{M_{33}\,Cp_{33}}(h_7 - h_8) \tag{17.7}$$

$$T_{37} = T_{44} - \frac{M_9}{M_{44}\,Cp_{44}}(h_{10} - h_9) \tag{18.7}$$

$$T_3 = T_2 + \frac{M_4\,Cp_4}{M_2\,Cp_2}(T_4 - T_5) \tag{19.7}$$

$$\theta_{m,I} = \frac{(T_{25} - T_4) - (T_{26} - T_3)}{\ln\left(\dfrac{T_{25} - T_4}{T_{26} - T_3}\right)} \tag{20.7}$$

$$\theta_{m,II} = \frac{(T_1 - T_{32}) - (T_6 - T_{35})}{\ln\left(\dfrac{T_1 - T_{32}}{T_6 - T_{35}}\right)} \tag{21.7}$$

$$\theta_{m,III} = \frac{T_{34} - T_{33}}{\ln\left(\dfrac{T_8 - T_{33}}{T_8 - T_{34}}\right)} \tag{22.7}$$

$$\theta_{m,IV} = \frac{T_{44} - T_{37}}{\ln\left(\frac{T_{44} - T_9}{T_{37} - T_9}\right)} \quad (23.7)$$

$$\theta_{m,V} = \frac{(T_4 - T_3) - (T_5 - T_2)}{\ln\left(\frac{T_4 - T_3}{T_5 - T_2}\right)} \quad (24.7)$$

$$T_7 = T_4 \quad (25.7)$$

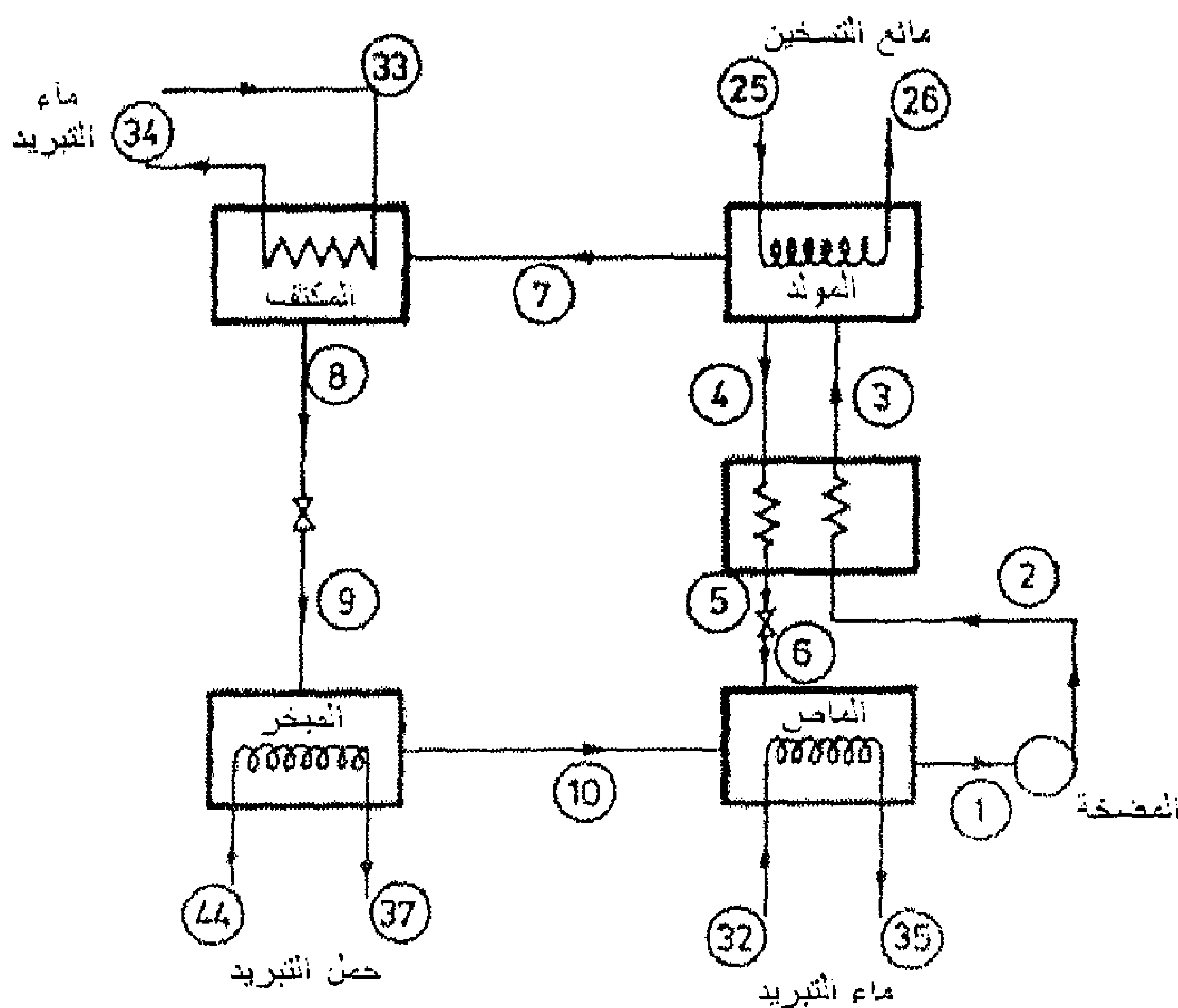
$$M_4 = \frac{x_1}{x_4} M_1 \quad (26.7)$$

$$M_7 = M_1 - M_4 \quad (27.7)$$

$$h_6 = h_5 \quad (28.7)$$

$$h_9 = h_8 \quad (29.7)$$

أما الأعداد العربية فتشير إلى الحالة في النقاط المبينة في الشكل (2.7). والخواص الحرارية لمحلول الماء ـ بروميد الليثيوم تُحسب من المعادلات الرياضية المبينة في الجزء 5.3.7.



شكل (2.7) مخطط لمنظومة تبريد امتصاصية H_2O-LiBr

4.3.7 محاكاة نظام تبريد NH_3-H_2O

هذا التحليل مشابه لذلك في نظام H_2O-LiBr. والأرقام اللاتينية من I إلى VI تشير إلى المولد، الماص، المكثف، المبخر، المبادل الحراري بين المولد والماص، المبادل الحراري بين المكثف والمبخر، فان المعادلات الحاكمة يمكن كتابتها على النحو التالي:

$$F_I = M_7\, h_7 + M_4\, h_4 - M_3\, h_3 - (U\,A)_I\, \theta_{m,I} = 0 \tag{30.7}$$

$$F_{II} = M_6\, h_6 + M_{10b}\, h_{10b} - M_1\, h_1 - (U\,A)_{II}\, \theta_{m,II} = 0 \tag{31.7}$$

$$F_{III} = M_7\,(h_7 - h_8) - (U\,A)_{III}\, \theta_{m,III} = 0 \tag{32.7}$$

$$F_{IV} = M_9\,(h_{10} - h_9) - (U\,A)_{IV}\, \theta_{m,IV} = 0 \tag{33.7}$$

$$F_V = M_4\,(h_4 - h_5) - (U\,A)_V\, \theta_{m,V} = 0 \tag{34.7}$$

$$F_{VI} = M_8\,(h_8 - h_{8b}) - (U\,A)_{VI}\, \theta_{m,VI} = 0 \tag{35.7}$$

$$T_{26} = T_{25} - (M_7\, h_7 + M_4\, h_4 - M_3\, h_3)/(M_{25}\, Cp_{25}) \tag{36.7}$$

$$T_{35} = T_{32} + (M_6\, h_6 + M_{10b}\, h_{10b} - M_1\, h_1)/(M_{32}\, Cp_{32}) \tag{37.7}$$

$$T_{34} = T_{33} + M_7(h_7 - h_8)/(M_{33}\, Cp_{33}) \tag{38.7}$$

$$T_{37} = T_{44} - M_9(h_{10} - h_9)/(M_{44}\, Cp_{44}) \tag{39.7}$$

$$h_3 = h_2 + M_4(h_4 - h_5) \tag{40.7}$$

$$h_{10b} = h_{10} + M_8(h_8 - h_{8b}) \tag{41.7}$$

$$\theta_{m,I} = \frac{(T_{25} - T_3) - (T_{26} - T_4)}{\ln\left(\dfrac{T_{25} - T_3}{T_{26} - T_4}\right)} \tag{42.7}$$

$$\theta_{m,II} = \frac{(T_6 - T_{35}) - (T_1 - T_{32})}{\ln\left(\frac{T_6 - T_{35}}{T_1 - T_{32}}\right)} \tag{43.7}$$

$$\theta_{m,III} = \frac{T_{34} - T_{33}}{\ln\left(\frac{T_8 - T_{33}}{T_8 - T_{34}}\right)} \tag{44.7}$$

$$\theta_{m,IV} = \frac{T_{44} - T_{37}}{\ln\left(\frac{T_{44} - T_9}{T_{37} - T_9}\right)} \tag{45.7}$$

$$\theta_{m,V} = \frac{(T_4 - T_3) - (T_5 - T_2)}{\ln\left(\frac{T_4 - T_3}{T_5 - T_2}\right)} \tag{46.7}$$

$$\theta_{m,VI} = \frac{T_8 - T_{8b}}{\ln\left(\frac{T_8 - T_{10b}}{T_{8b} - T_{10b}}\right)} \tag{47.7}$$

$$T_7 = T_4 - 5 \tag{48.7}$$

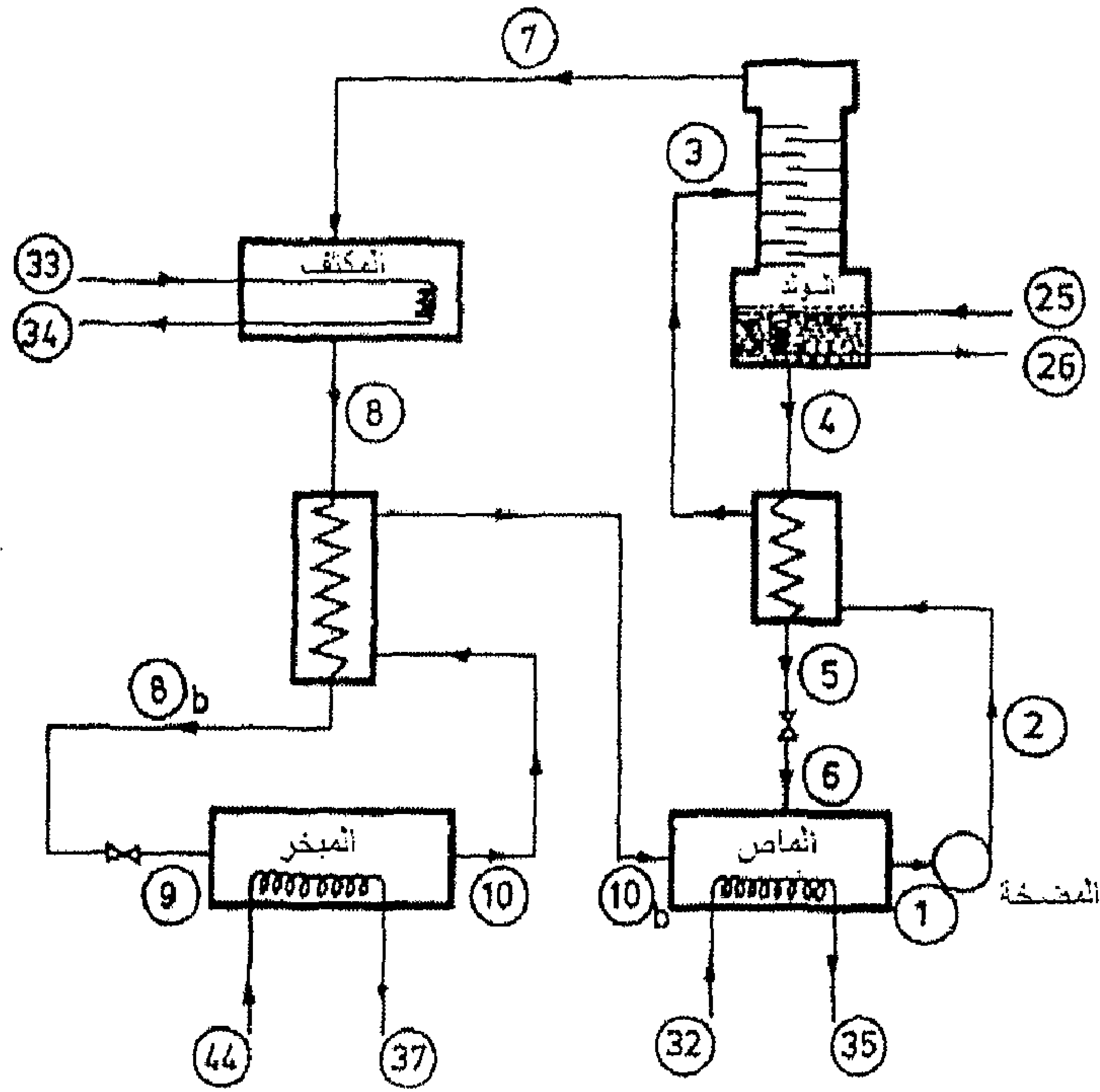
$$M_4 = \frac{x_7 - x_3}{x_7 - x_4} M_3 \tag{49.7}$$

$$M_7 = M_3 - M_4 \tag{50.7}$$

$$h_6 = h_5 \tag{51.7}$$

$$h_9 = h_{8b} \tag{52.7}$$

في المعادلات السابقة، تشير الأعداد العربية إلى الحالة في النقاط المبينة في الشكل (3.7). أما الخواص الحرارية للمحلول العامل فتُحسب من المعادلات الرياضية المبينة في الجزء 5.3.7.



شكل (2.7) مخطط لمنظومة تبريد امتصاصية NH_3-H_2O

5.3.7 العلاقات الرياضية للخواص الحرارية لموائع التبريد، الموائع الماصة ومحاليل التبريد

الخواص الحرارية لموائع التبريد، تعين من العلاقات الرياضية المتحصل عليها من منحنيات وجداول الخواص. فالعلاقات الرياضية لمحلول H_2O-LiBr متوفرة عند (Harries, Chen, 1977) وتلك لمحلول NH_3-H_2O تؤخذ من (Wilbur, Mancini, 1976).

(أ) ضغط بخار الماء (P، MN/m^2 و T، $°C$)

$$\log_{10} P = -3.21254 + 3.13619\times10^{-2}T - 1.22512\times10^{-4}T^2 + 3.6384\times10^{-7}T^3 - 5.6707\times10^{-10}T^4 \quad (53.7)$$

(ب) إنثالبي الماء المشبع (h، J/kg و T ، °C)

$$h = 4.1868 \times 10^3 (T - 25) \qquad (54.7)$$

(جـ) إنثالبي بخار الماء المشبع (h، J/kg و T ، °C)

$$h = (1.8T + 2397) \times 10^3 \qquad (55.7)$$

(د) إنثالبي بخار الماء المحمص عند درجة حرارة T و عند ضغط مناظر لدرجة حرارة التشبع T_s (h، J/kg و T ، °C)

$$h = (1.926T - 0.126T_s + 2397) \times 10^3 \qquad (56.7)$$

(هـ) تركيز مائع LiBr في محلول H$_2$O-LiBr

$$x = 0.1[\mathrm{Exp}\left(\frac{-P}{32125} + 1.819\right).(T - 16.42\ln P + 105.9)]^{1/3} \qquad (57.7)$$

حيث: P، MN/m^2 و T ، °C

(و) الحرارة النوعية لمحلول H$_2$O-LiBr

$$Cp = \left(2.01x^2 - 5.15x + 4.23\right) \times 10^3 \qquad (58.7)$$

(ز) إنثالبي محلول H$_2$O-LiBr

$$h = 1.744 \times 10^6 x^2 - 1.912 \times 10^6 x + 0.285 \times 10^6 + Cp(T - 25) \qquad (59.7)$$

حيث: h، J/kg و T ، °C

(ح) درجة حرارة التعادل لمحلول H$_2$O-LiBr

$$T = 10^3 x^3\, \mathrm{Exp}\left(\frac{P}{32125} - 1.819\right) + 16.42\ln P - 105.9 \qquad (60.7)$$

حيث: P، MN/m^2 و T ، °C

(ط) إنثالبي سائل الأمونيا عند درجة حرارة T

$$h = 4.65\times10^{3}(T+40) \qquad (61.7)$$

حيث: h، J/kg و T ، °C

(ي) إنثالبي بخار الأمونيا المشبع عند درجة حرارة T

$$h = 1.06\times10^{3}T + 1.44\times10^{6} \qquad (62.7)$$

(ك) إنثالبي بخار الأمونيا المحمص عند درجة حرارة T_1 عند ضغط مناظر لدرجة حرارة التشبع T_2

$$h = 2.68\times10^{3}T_1 - 1.64\times10^{3}\ T_2 + 1.44\times10^{6} \qquad (63.7)$$

(ل) إنثالبي محلول NH_3-H_2O عند درجة حرارة T وتركيز الأمونيا x

$$\begin{aligned} h = &-3.817 - 681.5x + 343x^2 + 786.5x^3 \\ &+ \left(4.29 + 3.222x - 17.58x^2 + 20.97x^3\right)T \\ &+ \left(4.29\times10^{3} - 3.108\times10^{-2}\ x + 0.1734x^2 - 0.184x^3\right)T^2 \end{aligned} \qquad (\text{أ } 64.7)$$

حيث: h، J/kg و T ، °C

معادلة أخرى لتحديد h أيضاً على الصورة التالية:

$$\begin{aligned} h = &-1.88\times10^{3} - 7.97\times10^{5}\ x + 9.88\times10^{5}\ x^2 \\ &+ \left(1.27\times10^{3} + 514x - 333x^2\right)T \\ &- \left(1.58 - 29x + 25.2x^2\right)T^2 \end{aligned} \qquad (\text{ب } 64.7)$$

(م) درجة الحرارة T_1 والتي عندها محلول الأمونيا وبتركيز x يغلي عند الضغط المناظر لدرجة حرارة التشبع للأمونيا T_2

$$\begin{aligned} T_1 = &146 - 300x + 155x^2 + \left(1.37 - 0.428x + 0.178x^2\right)T_2 \\ &+ \left(-0.00051 + 0.00218x + 0.00174x^2\right)T_2^2 \end{aligned} \qquad (65.7)$$

(ن) درجة الحرارة محلول NH_3-H_2O T ، °C عند الإنثالبي h، kJ/kg و تركيز الأمونيا x

$$T = 1.358 + 1401x + 2.585x^2 - 281.5x^3 + \left(0.1982 + 0.2632x - 0.755x^2 + 0.6248x^3\right)h + \left(3.927\times10^{-5} - 1.836\times10^{-4}x - 2.548\times10^{-4}x^2 + 4.696\times10^{-4}x^3\right)h^2 \quad (66.7)$$

6.3.7 الدلائل التصميمية لأنظمة التبريد الامتصاصية

يعد تحديد المركبات العديدة لعملية محاكاة منظومات التبريد الامتصاصية وتعيين الخواص الحرارية لمائع التبريد بواسطة المعادلات الرياضية، فإنه من الضروري معرفة 16 مدلول للبدأ في عملية المحاكاة. هذه الدلائل مدرجة في الجدول (4.7).

جدول (4.7) الدلائل التصميمية لمنظومات التبريد الامتصاصية

الجزء / المدلول	المولد (I)	الماص (II)	المكثف (III)	المبخر (IV)	المبادل (V)	المبادل* (VI)
معدل تدفق المائع الخارجي	$\dot{m}_{25}$	$\dot{m}_{32}$	$\dot{m}_{33}$	$\dot{m}_{44}$	—	—
درجة حرارة دخول المائع الخارجي	T_{25}	T_{32}	T_{33}	T_{44}	—	—
معدل تدفق المائع الداخلي	—	M_1	—	—	—	—
تركيز المائع الداخلي	—	x_1	—	—	—	—
مائع ـ مائع التوصيل الحراري	$(UA)_1$	$(UA)_2$	$(UA)_3$	$(UA)_4$	$(UA)_5$	$(UA)_6$

* فقط في حالة منظومات NH_3-H_2O

4.7 طرق أخرى للتبريد

إلى جانب دورة التبريد الامتصاصية، والتي تمت دراستها في الجز السابق، فان هناك بعض الطرق الأخرى للحصول على التأثير التبريدي، والتي يمكن استخدامها للحصول على الراحة الحرارية في فصل الصيف وبتكاليف أرخص من الدورة الامتصاصية. وسيتم التطرق في هذا الجزء باختصار إلى بعض من هذه الطرق.

بعض هذه الطرق قد لا تصنف كتبريد شمسي وبعضها قد يصنف تحت التطبيقات الغير فعالة للطاقة الشمسية. هذه التطبيقات تعتبر مهمة كخيار بديل ويجب تغطيتها عند الحديث عن التبريد الشمسي.

1.4.7 التبريد التبخيري

لمناطق العالم الساخنة الجافة المناخ، يمكن أن تكون الرطوبة القليلة ميزة للحصول على التأثير التبريدي. ويمكن إنجاز ذلك برش الماء على تيار الهواء الساخن الجاف، وهذا سيسبب في تبخير جزء من الماء، فتطرح طاقة التبخير للماء من طاقة الهواء الساخن الجاف، وبهذا يصبح الهواء أبرد وأكثر رطوبة مما كان عليه. هذه العملية تُسمى بالتبريد التبخيري.

الشكل (4.7) يبين نظام تبريد تبخيري ابتدائي مع المنحني السيكومتري للعملية. وقد أنجزت العملية عند ثبات درجة حرارة البصلة الرطبة. ومعادلة اتزان الطاقة يمكن أن تكون على الصورة التالية:

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_f = \dot{m}_a h_2 \qquad (67.7)$$

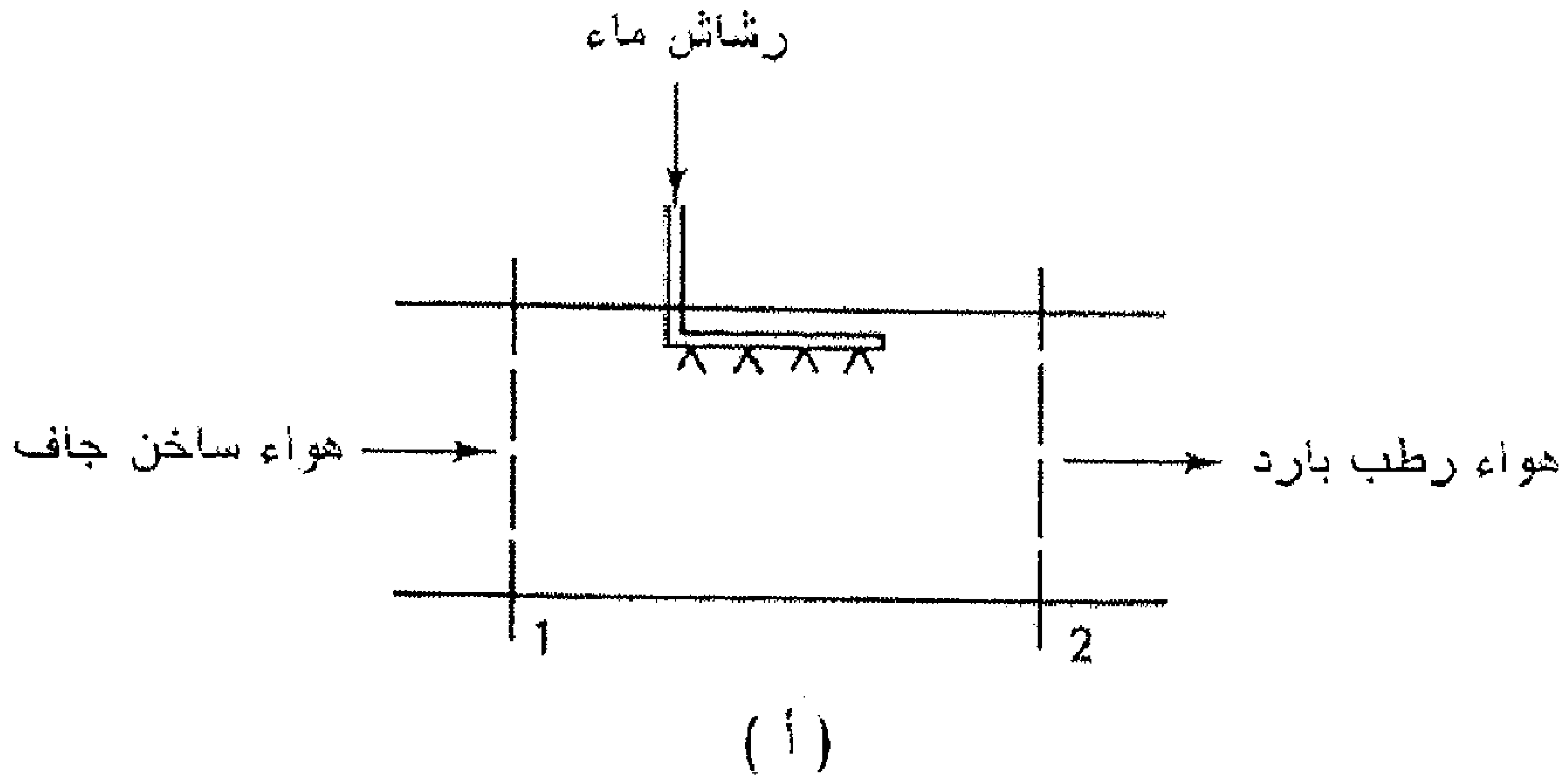
أو:

$$\dot{m}_a (h_{a1} + \omega_1 h_{v1}) + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_f = \dot{m}_a (h_{a2} + \omega_2 h_{v2}) \qquad (68.7)$$

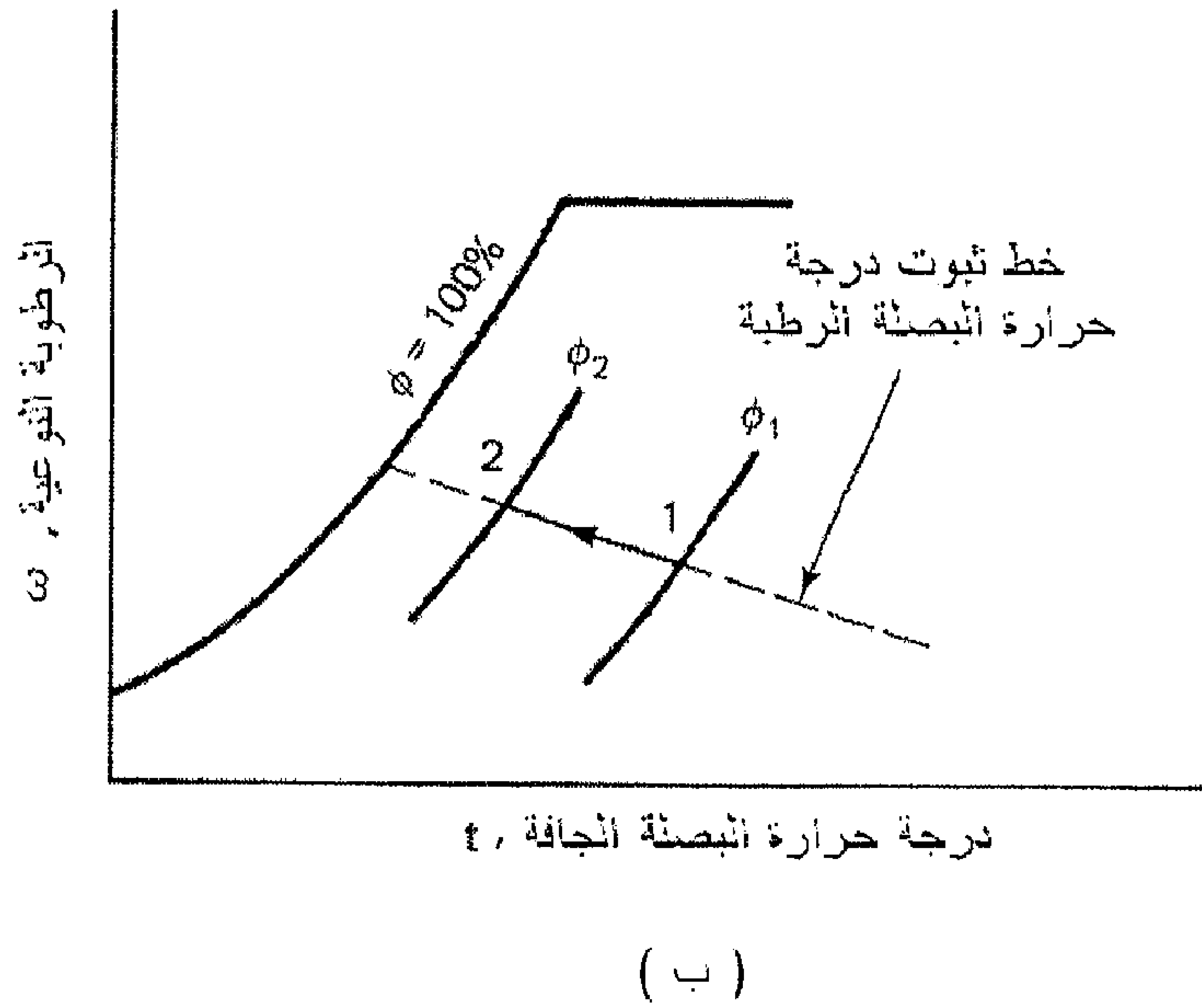
ومعدل تبخير الماء يكون:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) \qquad (69.7)$$

يجب ذكر أن التبريد التبخيري، الهواء الرطب البارد يمكن أن يستخدم لتبريد هواء جاف من خلال مبادل حراري، لهذا النمط فانه يمكن تجنب حدوث عدم راحة حرارية بسبب زيادة الرطوبة الملازمة لعملية التبريد التبخيري.



(أ)



(ب)

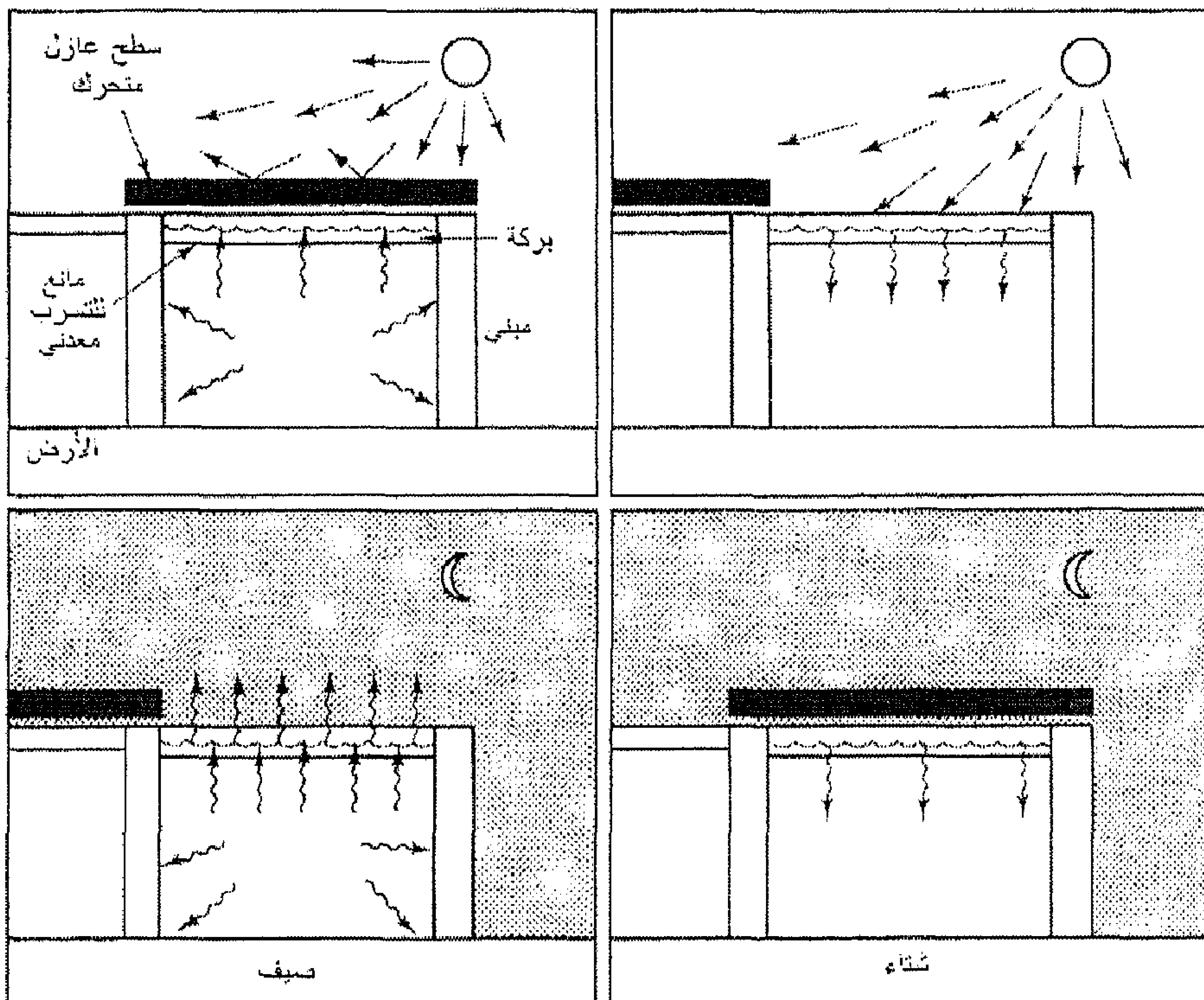
شكل (4.7) مخطط لدورة تبريد تبخيري (أ)، والعملية على منحنى السيكومتري (ب)

2.4.7 التبريد الإشعاعي

في العديد من الأيام المشرقة الحارة غالباً ما يكون المساء صحواً بارداً. ولمثل ذلك المناخ فان التبادل بالإشعاع في الليل من أسقف وجدران المباني إلى السماء يمكن استغلاله كطريقة للحصول على تأثير تبريدي في فصل الصيف (Hsieh, 1981). إن تصميماً مبسطاً مبين في الشكل (5.7)، يستخدم بركة ماء على السقف بغطاء معتم

عازل متحرك فوقها وطبقة معدنية مانعة للتسرب أسفلها. والغطاء العازل يُسحب في الليل لتبريد البركة عن طريق الإشعاع إلى السماء وبواسطة التبخير. فإذا كان التبخير غير مرغوب فانه يمكن تغطية البركة بغطاء بلاستيكي شفاف. والغطاء العازل يُغلق خلال فترة النهار لوقاية البركة من الحرارة. وبما أن مانع التسرب المعدني متلامس مع سطح البركة المائية فان الحرارة الصيفية المكتسبة ستنتقل إلى البركة.

والبركة السقفية المبينة في الشكل (5.7) صُممت أيضاً لاستخدامها للتدفئة في فصل الشتاء. في هذه الحالة الغطاء العازل يُسحب نهاراً في الأيام المشرقة الدافئة لتجميع الطاقة الشمسية في ماء البركة وتُغلق لحماية الطاقة المخزونة من التبدد بالإشعاع ليلاً. وبعد أن يصبح ماء البركة دافئاً فان الحرارة ستنتقل من البركة إلى حيز المبنى من خلال مانع التسرب المعدني.

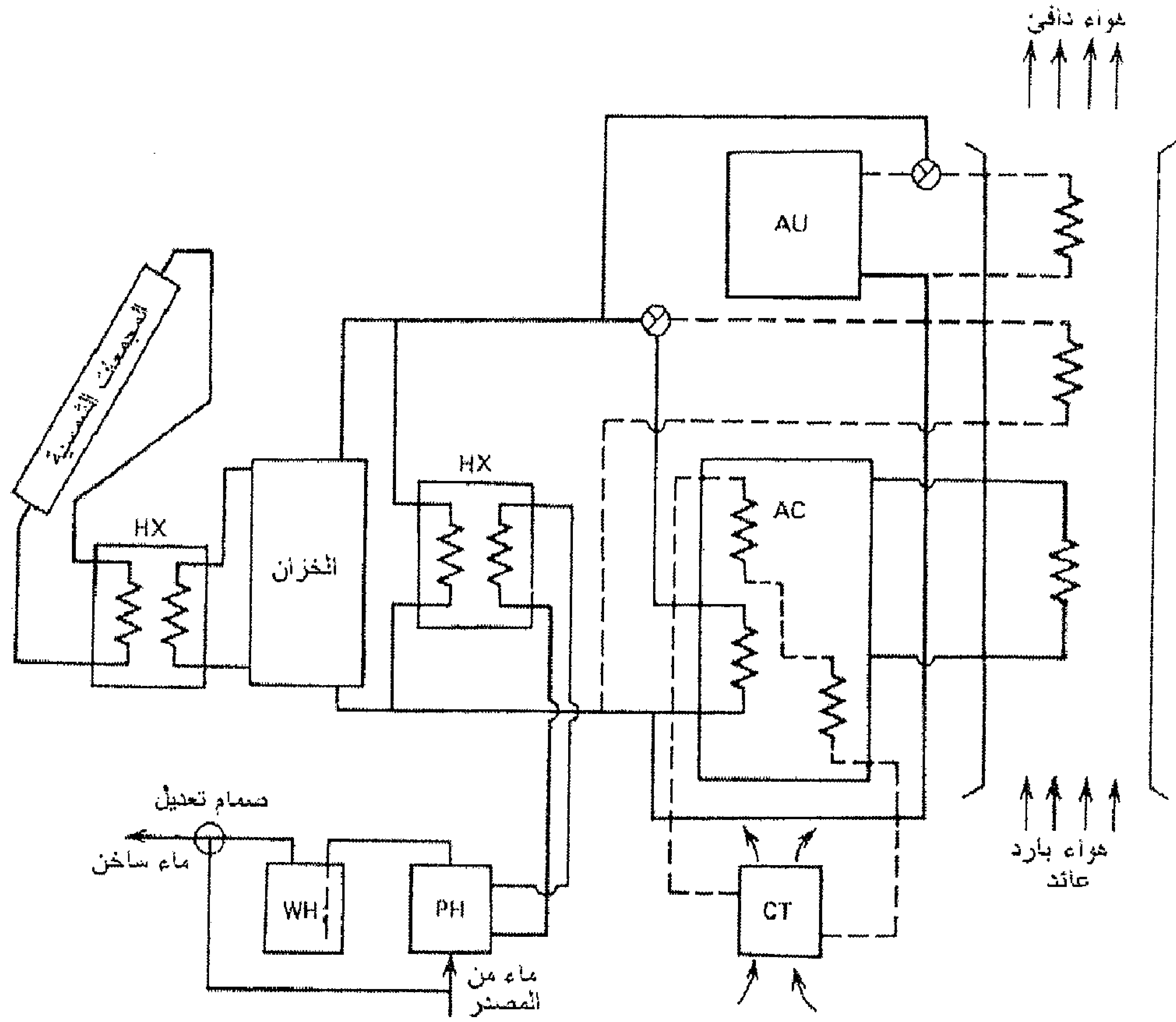


شكل (5.7) تكييف الهواء بواسطة بركة سطحية وعازل متحرك، من (Hay, Yellott, 1970)

5.7 أنظمة التبريد والتسخين الشمسية المشتركة

يمكن عمل تطبيقات عديدة لتكييف الهواء بالطاقة الشمسية بالاقتران مع التسخين الشمسي بنفس المجمع الشمسي، الخزان، ونظام الطاقة الإضافي لتأدية الوظيفتين وتجهيز الماء الساخن. ويوضح شكل (6.7) نظام تبريد وتسخين مشترك على أساس التبريد الامتصاصي لتكييف الهواء (Duffie, Beckman, 1991).

هنالك اعتبارات مهمة في أنظمة التبريد والتسخين المشتركة وتتعلق بأحمال الشتاء والصيف. يعتبر الجو العامل الرئيس ويهيمن التبريد بطبيعة الحال في المناطق الحارة أكثر من التدفئة. أيضاً من المهم تصميم شكل المباني والذي يؤثر في متطلبات الطاقة للحملين (حمل التبريد وحمل التدفئة)، وهذا يشمل التظليل باستخدام المظلات، النباتات وكذلك اتجاه المبنى. فمثلاً مكان الخزان، بغض النظر داخل أو خارج المبنى، سيؤثر على أحمال التبريد والتسخين. الحرارة ستخزن في وحدة التخزين في داخل المبنى، وفقد الحرارة من الخزان غير متحكم فيه وتكتسب خلال فصل التدفئة وتعتبر حمل إضافي خلال فصل التبريد. أما عن المجمعات الشمسية، فإذا كانت جزء من جسم المبنى، الفقد السفلي من المجمع سيكون أيضاً غير متحكم به وسيكتسب خلال موسم التدفئة ويصبح حملاً إضافيا خلال موسم التبريد.



شكل (6.7) مخطط لمنظومة شمسية مشتركة تدفئة، تكييف هواء وتسخين ماء، باستخدام مبرد امتصاصي H_2O-LiBr. خطوط السريان الصلبة للتبريد، والمتقطعة للتسخين. AU يمثل مصدر الطاقة الإضافي، AC مكيف الهواء، CT برج التبريد، PH خزان التسخين المبدئي، WH سخان الماء

وزاوية ميل المجمع، S، يمكن أن توضع اعتماداً على نوع الحمل المسيطر. زاوية الميل المثالية حوالي $S = L + 15°$ للاستخدام الشتوي، $S = L - 15°$ للاستخدام الصيفي وحوالي $S = L$ للاستخدام السنوي، حيث L هي زاوية خط عرض الموقع. على كل حال، زاوية ميل المجمع، تعتمد بصورة كبيرة على حالة الطقس المحلية (كما تم ذكره في الفصل الثاني). أما زاوية اتجاه المجمع، ψ، فهي

تعتمد على توزيع الأحمال اليومية. فحمل التدفئة يكون أكبر صباحاً، ولـذا فزاويـة اتجاه المجمع يجب أن تكون سالبة، بينما يكون حمل التبريد أعظم بعد الـزوال، ولـذا فزاوية الاتجاه تكون موجبة. محاكاة النظـام بالحاسـوب ستجيب عـن العديـد مـن الأسئلة [أنظر (Oonk, et al, 1975)] . على العموم، زاوية الاتجاه ليسـت بـالمتغير الحرج. المشكلة الرئيسة في التصميم تكمن في تحديـد المسـاحة المثاليـة للمجمعـات الشمسية، والتي عندما تكون أقل منها (المساحة المثالية) سيؤدي إلى استعمال مفرط في الطاقة الإضافية، وإذا كانت أكبر منها، فـإن ذلـك سـيؤدي إلى زيـادة في تكلفـة المنظومة والتقليل من معامل استغلال المنظومة. وتكييف الهـواء الامتصاصـي أكثـر تكلفة من التكييف الميكانيكي. في المناخ البـارد (حيـث حمـل التبريـد قليـل)، فـان استخدام التبريد الامتصاصي سيؤدي إلى ارتفاع تكلفة التبريد بسبب ضآلة معامـل استغلال المنظومة. أما في المناخ الحار فيجب إجراء دراسة اقتصـادية للمقارنـة بـين البدائل الممكنة الاستخدام.

6.7 محاكاة نظام تكييف الهواء يعمل بالطاقة الشمسية

المحاكاة دائماً تزودنا بمعلومات مفيدة عن تأثير متغيرات التصـميم علـى الأداء الطويل الأمد للمبردات الشمسية. في هذا الجزء تظهر نتائج محاكاة النظـام المـبين في الشكل (6.7) نظام محلول H_2O-LiBr الموصوف في الجزء 5.7.

المبنـى الـذي تحـت المحاكـاة بمسـاحة أرضـية $150\,m^2$، جيـد العـزل $(UA)_h = 232\,W/^\circ C$، تسرب الهواء يقدر بحوالي 1/2 تغير هواء لكل سـاعة، حمـل التبريد الكامن يُقدر بحوالي 0.3 من حمـل التبريـد المحسـوس، (ASHRAE, 1977). درجة الحرارة المرغوبة في الغرفة تتراوح من 19 إلى $25^\circ C$. حمل تسخين الماء يحسـب من تسخين كمية 300 kg/day من 11 إلى $55^\circ C$. سعة الخزان المبدئي $0.35\,m^3$.

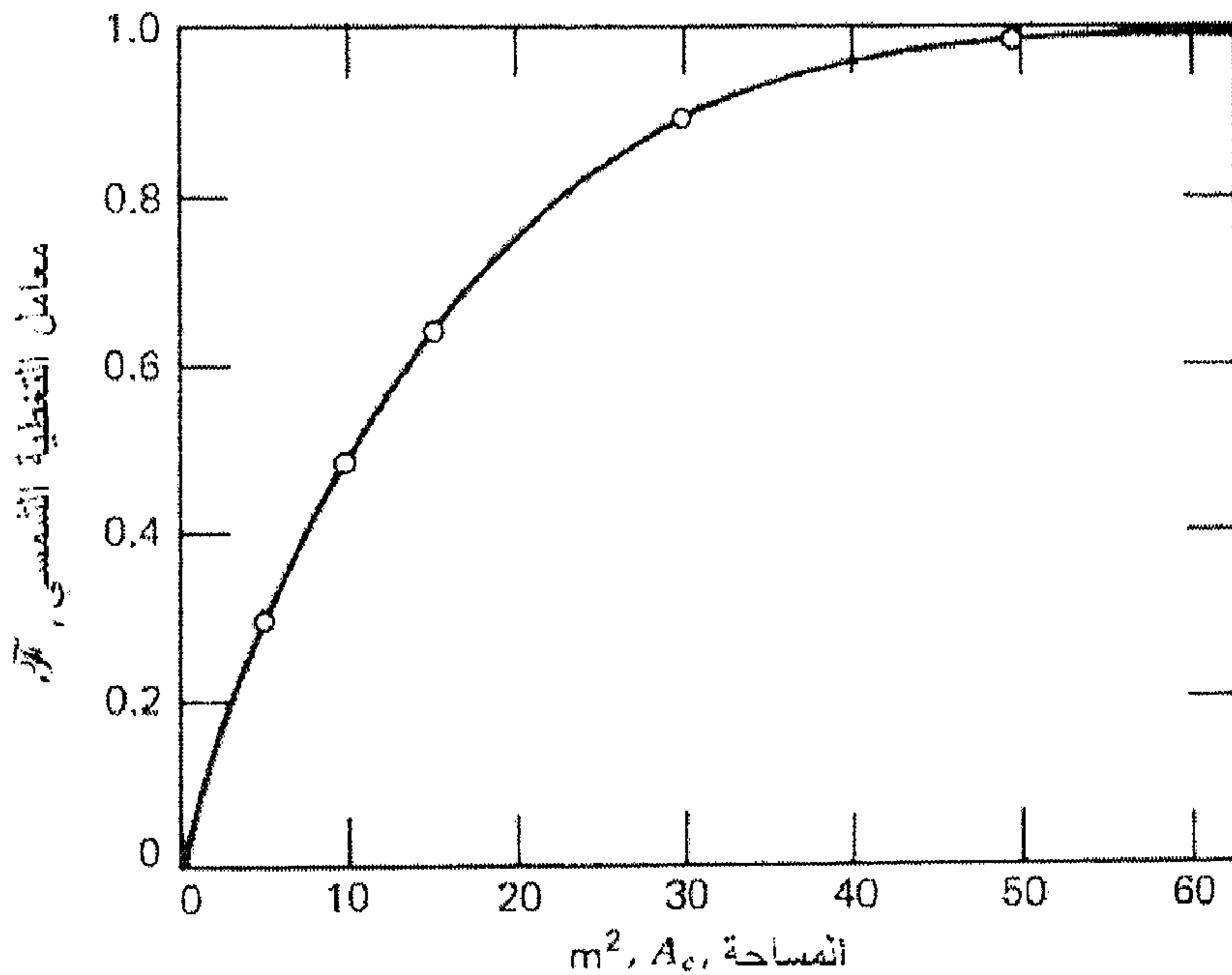
المجمعــات الشمســية بالخصــائص الحراريــة التاليــة: $F_R(\tau\alpha)_n = 0.72$، $F_R U_L = 4.94\,\mathrm{W/m^2C}$، وتميل بزاوية $S = 36^\circ$ في اتجاه الجنوب في مدينـة تقـع علـى خـط عـرض $35^\circ N$. قيمـة $F_{hx} = 0.99$. نتـائج المحاكـاة أظهـرت لخمـس مساحات للمجمعات من 5 إلى $50\,\mathrm{m^2}$. محلول ضد التجمـد $c_p = 3900\,\mathrm{J/kg\,C}$، يـدور بمعـدل $\dot{m}/A_c = 0.0015\,\mathrm{kg/m^2s}$. حجـم وعـاء التخـزين $0.10\,\mathrm{m^3/m^2}$، ومعامل الفقد الحراري $10.5\,\mathrm{W/m^2C}$، وتحدد درجة حـرارة الماء في الخـزان عنـد $100^\circ\mathrm{C}$ وأقل درجة حرارة للتسخين الشمسي هي $30^\circ\mathrm{C}$.

المبرد بسعة $4.2\,\mathrm{kW}$، ثابت زمن التشغيل 0.133 ساعة، وثابـت زمـن التبريـد 1.05 ساعة. أقل درجة حرارة مفيدة للمصدر $77^\circ\mathrm{C}$.

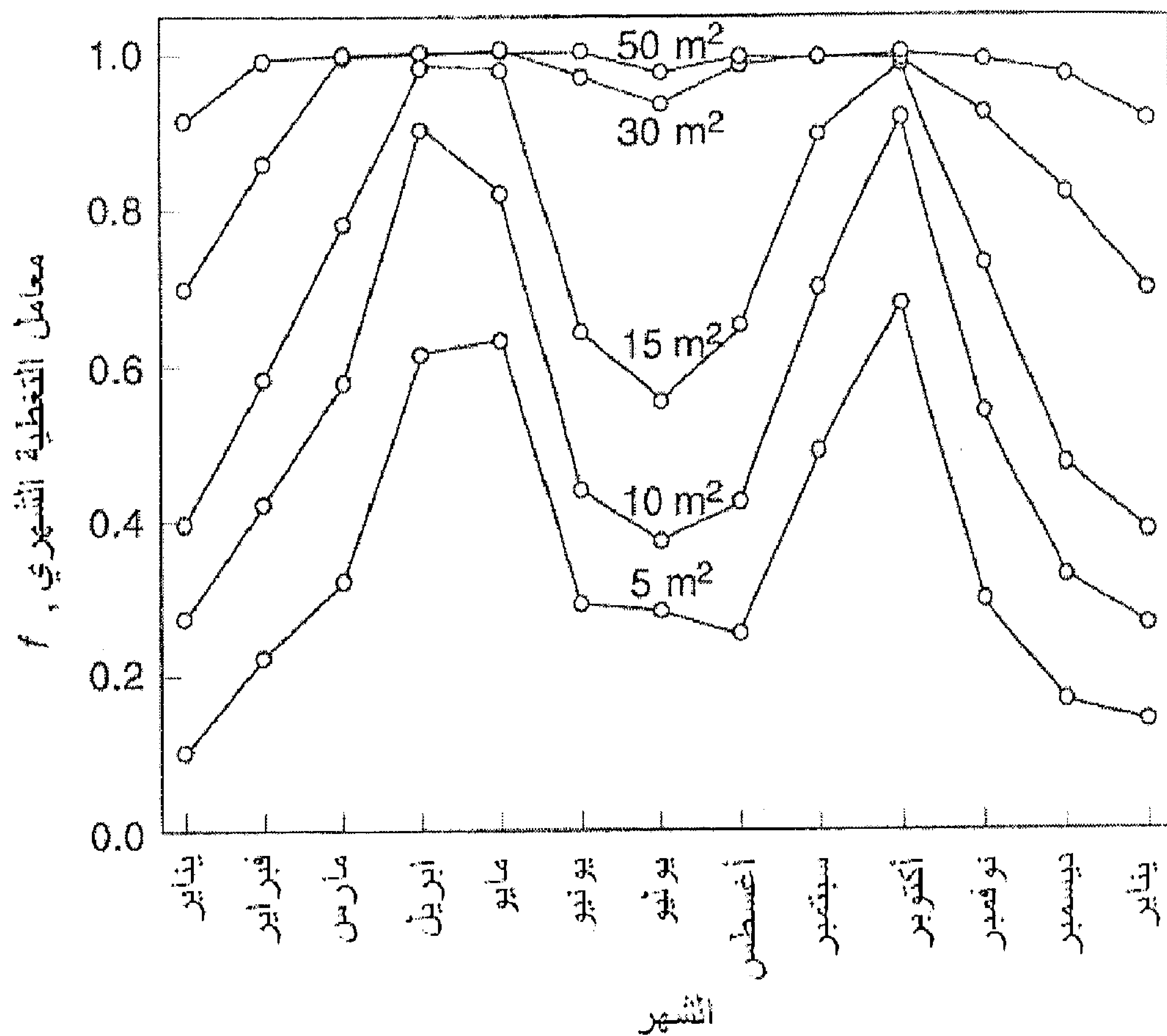
الطاقة الإضافية في هذه المحاكاة تـزود بطـريقتين: الطريقـة الابتدائيـة بواسـطة إضافة الحرارة إلى المولد عند الحاجة. إذا كانت درجة حرارة حيـز المبنـى باسـتمرار أعلى من نقطة جهاز تحكم درجة الحرارة، فان مبرد ميكانيكي إضافي يزود بالطاقـة اللازمة لامتصاص حمل التبريد والتي لا يمكن تغطيته بواسـطة المـبرد الامتصاصـي الشمسي منفرداً.

شكل (7.7) يبين تبـاين معامـل التغطيـة السـنوي للطاقـة اللازمـة (للتدفئـة، تسخين المياه والتبريد)، لهذا النظام بدلالة مساحة المجمعات الشمسية. والمنحنـى لـه نفس الشكل العام لذلك في أنظمة التدفئة. لحالة المناخ في المنطقة المدروسة، معامـل التغطية الشمسي يصل إلى 0.98 عند مساحة مجمعات شمسية $50\,\mathrm{m^2}$ لسنة المحاكاة. معاملات التغطيـة الشـهرية مبينـة في الشـكل (8.7)، حيـث يكـون واضـحاً عـدم استطاعة المساحات الصغيرة للمجمعات الشمسية على تغطية حمل التدفئة الشـتوي الكبير وكذلك بالنسبة لأحمـال التبريـد الصـيفية. وكمـا في أنظمـة التسـخين، فـان

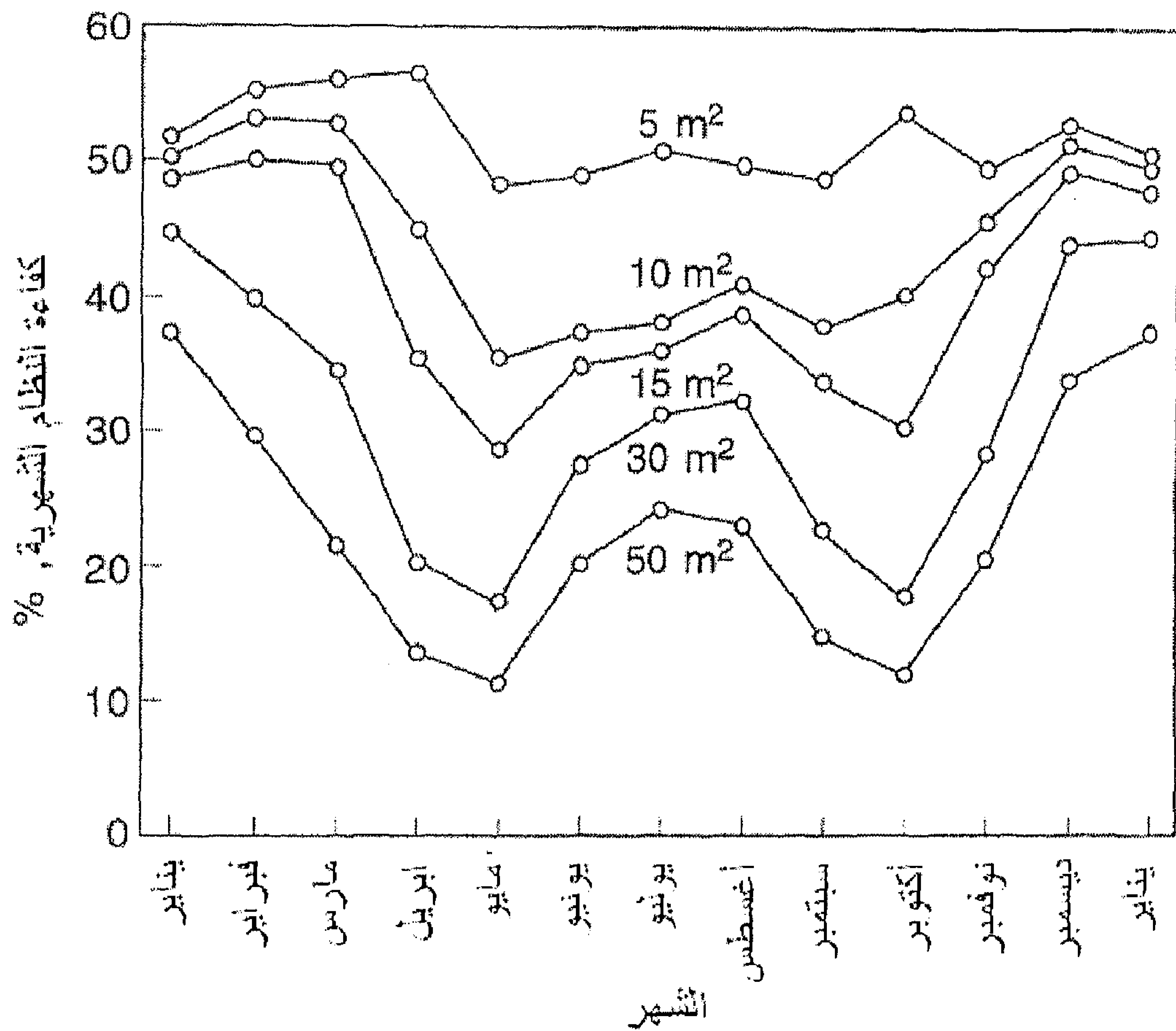
الأنظمة الكبيرة تبين كفاءات كلية رديئة على طول فصلي الربيع والخريف. والأنظمة الكبيرة تعمل عند درجات حرارة عالية والفاقد الحراري من المجمعات الشمسية يكون كبيراً. ويبين الشكل (9.7) مخطط الكفاءة الشهرية (نسبة الطاقة المجمعة إلى الطاقة الشمسية الساقطة على المجمعات الشمسية للشهر) للمساحات الخمس. واضح أن الكفاءات العالية للمجمعات الشمسية تكون مصاحبة لمعاملات تغطية شمسية قليلة لهذه الأنظمة بتفاوت الأحمال الموسمية. ويبين الشكل (10.7)، لمساحة مجمعات شمسية $15 m^2$، الطاقة المركبة لأحمال التدفئة، التبريد وتسخين المياه ومساهمة الطاقة الشمسية لتغطية هذه الأحمال. تبدأ السنة في سبتمبر، بين موسم التدفئة والتبريد.



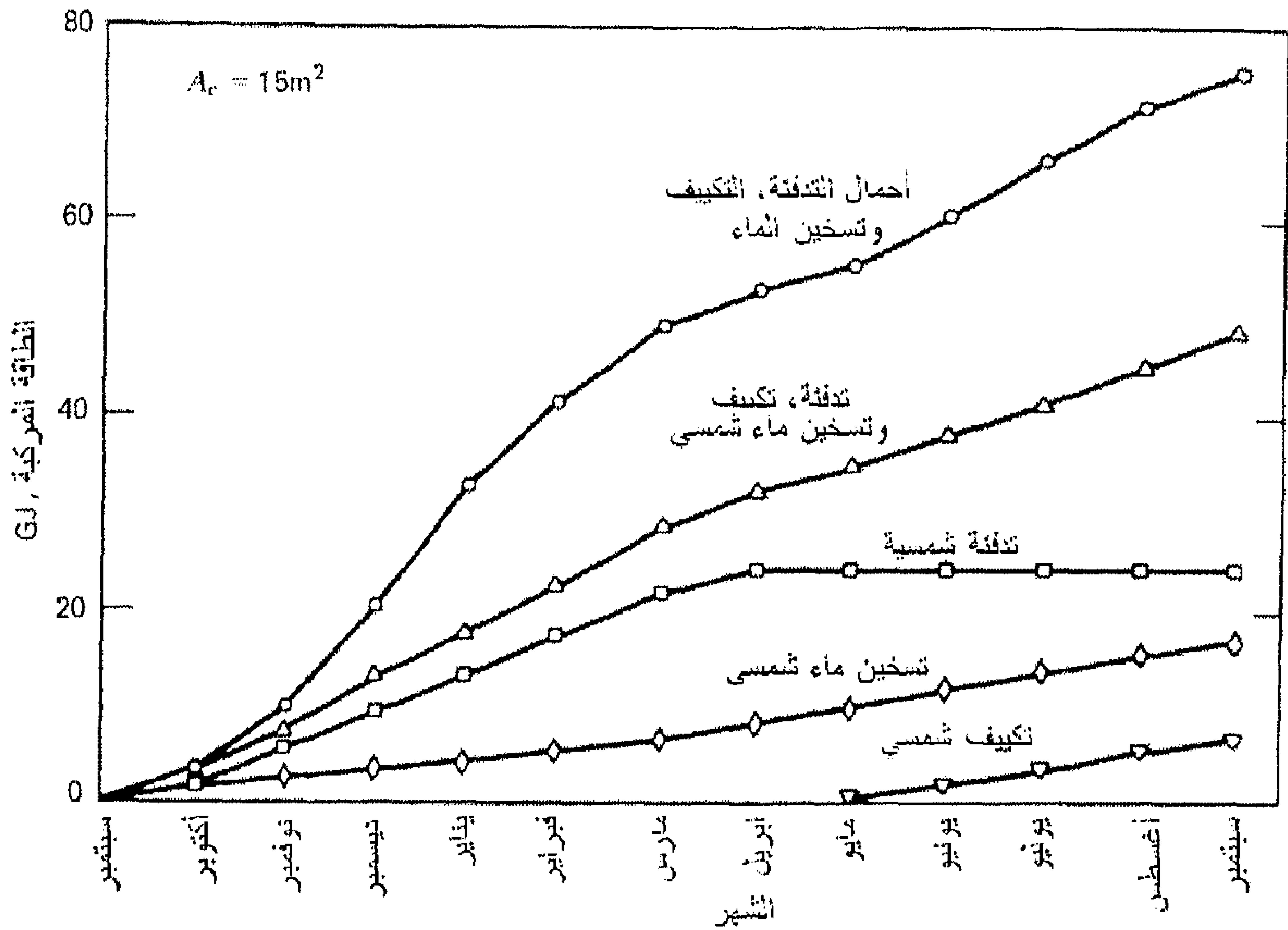
شكل (7.7) معامل التغطية السنوي للطاقة الشمسية لمبنى المحاكاة



شكل (8.7) معامل التغطية الشهري للطاقة الشمسية لخمس مساحات للمجمعات الشمسية



شكل (9.7) الكفاءات الشهرية لمساحة المجمعات الخمس



شكل (10.7) الأحمال المركبة ومساهمة الطاقة الشمسية لمساحة مجمعات $15\,m^2$

لمبنى المحاكاة

النتائج السنوية للمحاكاة ملخصة في الجدول (5.7). أحمال التسخين والتبريد تزداد ببطئ مع مساحة المجمعات الشمسية، لأن جهاز التحكم يحافظ على درجة حرارة حيز المبنى عند درجة حرارة أعلى من المتوسط في فصل الشتاء وأقل من المتوسط في فصل الصيف (اختلاف أجهزة التحكم ستسبب في بعض الاختلاف في الأحمال، ولكن السلوك العام والنتيجة النهائية لن تتغير). الكفاءة السنوية كما هو مبين تقل بزيادة مساحة المجمعات الشمسية.

جدول (5.7) نتائج المحاكاة لمنظومة شمسية لأغراض التدفئة والتبريد وتسخين المياه لمدينة Albuquerque (Duffie, Beckman, 1991)

مساحة المجمعات الشمسية، m^2	5	10	15	30	50
حمل التدفئة، GJ	38.6	40.2	41.0	42.1	43.3
حمل تكييف الهواء، GJ	13.9	13.6	13.2	14.3	16.9
حمل تسخين المياه المنزلية، GJ	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2
الحمل الكلي، GJ	72.8	74.0	74.5	36.1	42.5
الجزء المغطى بالطاقة الشمسية من حمل التدفئة، GJ	8.7	17.9	24.5	36.1	42.5
الجزء المغطى بالطاقة الشمسية من حمل تكييف الهواء، GJ	0.0	5.0	6.7	13.8	16.8
الجزء المغطى بالطاقة الشمسية من حمل تسخين المياه، GJ	12.9	15.2	16.6	18.6	19.6
الجزء المغطى بالطاقة الشمسية من الحمل الكلي، GJ	21.6	35.6	47.8	68.4	78.9
نسبة تغطية الحمل عن طريق الطاقة الشمسية	0.30	0.48	0.64	0.89	0.98
كفاءة المجمع الشمسي، %	52	44	39	30	22
الطاقة المتولدة، GJ/m^2	4.32	3.56	3.19	2.28	1.58

المراجع

1. أبوبكر عويدات، مقدام جيجان، هندسة التبريد، جامعة سبها، سبها ـ ليبيا، 2001.

2. Asher, N.G., Reti, A.R., *UN Conf. New Sources Energy*, Rome, **6**, 66 (1975). "Engineering and Economic Study of the Use of Solar Energy Especially for Space Cooling in India and Pakistan."

3. ASHRAE *Handbook and Product Directory/Equipment*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, New York (1977).

4. Duffie, J. A., Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Suns inc., 2nd edition, 1991.

5. Duffie, J.D., Sheridan, N.R., *Mech. and Chem. Eng. Trans*, Inst Engs, Australia, 79 (1965). "Lithium Bromide-Water Refrigerators for Solar Operation."

6. Elsayed, M.M, Taha, I.S., Sabbagh, J.A., *Design of Solar Thermal Systems*, Scientific Publishing Center, King Abdulaziz University, Jeddah- Saudi Arabia Kingdom, (1984).

7. Farber, E.A., *ISES Conf.*, Melbourne, paper 6/58, (1970). "Design and Performance of a Compact Solar Refrigeration System."

8. Ferreira, C.A.I., *Solar Energy*, **32**, 231 (1984). "Thermodynamic and Physical Property Data Equations for Ammonia-Lithium Nitrate and Ammonia-Sodium Thiocyanate Solutions."

9. Harries, A.W., Chen, C.N., *Heat Transfer in Solar Energy Systems*, Howell, U.R., Min, T. (ed.), Published by ASME, 103 (1977). "Operational Dynamics of Coupled Flate Plate Solar Collector and Absorption Cycle Heat Pump System with Energy Storage."

10. Hay, H.R., Yellott, J.I., *Mechanical Engineering*, **92**, 19 (1970). "A Naturally Air-Conditioned Building."

11. Hsieh, S. J., *Solar Energy Engineering*, Prentic-Hall, (1981).

12. Kreith, F., Kreider, J.F., *Principles of Solar Engineering*, Hemisphere Publishing Corporation, USA, (1978).

13. Lof, G.O.G., *Introduction to Utilization of Solar Energy*, Zarem, A.M., Erway, D.D. (ed.), McGraw-Hill, New York, (1963).

14. Mansoori, G.A., Patel, V., *Solar Energy*, **22**, 483 (1979). "Thermodynamic Basis for the Choic of Working Fluids for Solar Absorption Cooling Systems."

15. Oonk, R., Beckman, L.W., Duffie, J.A., *Solar Energy*, **17**, 21 (1975). "Modeling of the CSU Heating/Cooling System."

16. Wilbur, P.J., Mancini, T.R., *Solar Energy*, **18**, 569 (1976). "A Comparison of Solar Absorption Air Conditioning Systems."

الفصل الثامن

الاعتبارات الاقتصادية والبيئية للطاقة الشمسية

1.8 مقدمة

تُصنف الطاقة الشمسية بأنها مرتفعة التكاليف الابتدائية وقليلة تكاليف التشغيل. لهذا فإن المشكلة الأساسية تكمن في مقارنة تكاليف الاستثمار وتكاليف التشغيل المستقبلية لعدة بدائل للطاقة. ومعظم المنظومات الشمسية بحاجة إلى مصدر إضافي للطاقة تقليدي (غير شمسي) وبهذا فان النظام يتضمن معدات الطاقة الشمسية ومعدات الطاقة التقليدية، والحمل السنوي يُغطى بواسطة مشاركة المصدرين. إن جوهر الموضوع يكمن في شراء معدات الطاقة الشمسية في الوقت الحاضر لتقليل شراء الوقود وتقليل الغازات السامة الضارة بالبيئة المنبعثة نتيجة لحرق الوقود الأحفوري التقليدي في المستقبل.

رغم معرفتنا الكاملة بمقدار التلوث الذي تحدثه محطات توليد الطاقة الكهربائية التقليدية، إلا أنه لا تأخذ الاعتبارات البيئية في الحسبان عند المفاضلة بين الطاقات المتجددة والطاقات التقليدية، والاستمرار في غض النظر عن هذا الموضوع يعتبر إجحافاً في حق الطاقة المتجددة. والجدول (1.8) يبين وجهتي النظر الاقتصادية والبيئية لبعض التقنيات المستخدمة في مجال صناعة الطاقة.

ولهذا السبب رأينا إضافة هذا الموضوع في هذا الجزء لأهميته وغيابه في المناهج التعلمية المتخصصة.

جدول (1.8) نظرة اقتصادية وبيئية على بعض تقنيات إنتاج الطاقة

التقنية	تعليقات اقتصادية	تعليقات بيئية
	الطاقات المتجددة	
الطاقة الشمسية	رأس مال كبير، كلفة تشغيل صغيرة. غير اقتصادية لتغطية الحمل الأقصى	صديقة للبيئة
طاقة الرياح	يتوجب بيع كافة الطاقة المنتجة للحصول على تكلفة مثالية، وبهذا لا يوجد تحكم على المتاح.	صديقة للبيئة
الطاقة الهيدرولوجية	يمكن أن تكون خياراً كاملاً مرناً للإنجاز السريع ما عدا في الأماكن التي لديها قيود موسمية قاسية على سريان الماء، (إلا أنه يستلزم تكلفة ابتدائية كبيرة لأقصى استغلال) ولكن سرعة الإنجاز والكلفة تتغير بشكل كبير من موقع إلى أخر.	لها بعض التأثيرات السلبية على الحياة المائية
الطاقة النووية	يتطلب رأس مال كبير جداً لتغطية الأحمال القصوى	تلوث نووي من الوقود النووي وتلوث حراري.
	الطاقات التقليدية	
توربين غازي بسيط، غاز طبيعي	التقنية الأقل تكلفة للأحمال القصوى	تلوث هوائي، حراري، ضجيج
توربين غازي بسيط، نفط	مناسب جداً للأحمال القصوى	تلوث هوائي، أرضي، حراري، ضجيج
دورة مشتركة، غاز طبيعي	رأس مال مناسب، مناسب للأحمال الأساسية والمتوسطة، وأقل للأحمال القصوى	تلوث هوائي، حراري، ضجيج
توربين بخاري، نفط	رأس مال كبير، مناسب للأحمال الأساسية والمتوسطة، وأقل للأحمال القصوى	تلوث هوائي، أرضي، مائي، حراري، ضجيج
توربين بخاري، فحم	رأس مال كبير جداً، مناسب للأحمال الأساسية والمتوسطة، ولا يصلح للأحمال القصوى	تلوث هوائي، أرضي، مائي، حراري، ضجيج

2.8 التحليل الاقتصادي

هناك القليل من المعايير الاقتصادية الشائعة الاستخدام لمقارنة الاستثمار في عدة بدائل، على سبيل المثال، الطاقة الشمسية والطاقة التقليدية. وهذه المعايير هي كالتالي (Hsieh, 1981):

- تكلفة دورة الحياة (LCC): وهي طريقة مكافئة توضع فيها كافة التكاليف، الحالية والمستقبلية، لجميع البدائل على أساس مشترك للقيمة الحالية وبالتالي يمكن إجراء مقارنة عادلة.
- التوفير خلال دورة الحياة (LCS): وهو عبارة عن الفرق بين تكاليف دورة الحياة (LCC) لنظام الوقود التقليدي فقط وهذه التكاليف (LCC) لنظام الطاقة الشمسية مع الطاقة الإضافية. إن النظام الذي يكون توفيره أكبر خلال فترة عمر النظام سيكون هو البديل الأفضل اقتصادياً.
- زمن استرجاع رأس المال: ويعرف بأنه، الوقت اللازم الذي يصبح فيه التوفير في الوقود مساوياً لقيمة رأس المال الابتدائي المستثمر في الطاقة الشمسية.

1.2.8 الزمن وقيمة النقود

قيمة النقود اليوم أفضل من قيمتها في المستقبل، وذلك بسبب أن النقود الآن يمكن استثمارها والحصول على بعض الفائدة منها، وبالتالي تصبح قيمتها أكبر في المستقبل. على العكس من ذلك، فان النقود أو السيولة المالية في المستقبل ستنخفض، وبالتالي فهي تساوي أقل من قيمتها الحالية. السيولة بعد مرور n سنة من الآن تقل عن قيمتها الحالية على أساس المعادلة التالية:

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \qquad (1.8)$$

حيث: P – القيمة الحالية للنقود، F – القيمة المستقبلية للنقود، i – الفائدة. وبهذا، سيولة بقيمة 100 وحدة نقدية، قيمتها بعد 5 سنوات من الآن تساوي فقط 68.06 وحدة نقدية بمعدل فائدة 8%.

التضخم، هو مؤشر اقتصادي يعني أن، كمية النقود اللازمة لشراء سلعة معينة تزيد مع الزمن، وذلك بسبب قلة قيمة النقود. بمعدل تضخم سنوي j ، فإن تكلفة الشراء E في نهاية السنة الأولى، ستصبح في نهاية عدد n من السنيين تكلفة مستقبلية F ، بناءاً على العلاقة التالية:

$$F = E\left(1+j\right)^{n-1} \qquad (2.8)$$

وبهذا فان ما تكلفته 100 وحدة نقدية في نهاية السنة الأولى، سيصبح بثمن 126.5 وحدة نقدية بعد مرور 5 سنوات بتأثير معدل تضخم 6%.

القيمة المستقبلية F ، كما هي معطاة في المعادلة (2.8) معرضة أيضاً للخصم نتيجة للقيمة الحالية للنقود، وتصاغ كالتالي:

$$P = \frac{E\left(1+j\right)^{n-1}}{\left(1+i\right)^{n}} \qquad (3.8)$$

لاحظ، في المعادلة السابقة أن P ، هي القيمة الحالية لدفعة نقدية مستقبلية عند نهاية n سنة، عندما تكون التكلفة أو الدفعة في نهاية السنة الأولى E . لدفعات سنوية متوالية، إذا كانت الدفعة الأولى 100 وحدة نقدية، وبمعدل تضخم 6%، فان الدفعة الخامسة ستكون 126.25 وحدة نقدية والتي تساوي فقط 85.92 وحدة نقدية اليوم بمعدل فائدة 8%.

المعادلة (3.8) تعطي القيمة الحالية لدفعة مستقبلية مفردة. بجمع كل القيم الحالية بعدد n ، مثل هذه الدفعات المستقبلية تنتج في القيمة الحالية الكلية P_{total} .

$$P_{total} = E\left[\sum_{m=1}^{n} \frac{(1+j)^{m-1}}{(1+i)^m}\right] \quad (4.8)$$

$$= E\left[PWF(n,j,i)\right]$$

حيث: يُسمى الرمز $PWF(n,j,i)$ بمعامل القيمة الحالية وتعطى بالعلاقة التالية:

$$PWF(n,j,i) = \sum_{m=1}^{n} \frac{(1+j)^{m-1}}{(1+j)^m} \quad (5.8)$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{i-j}\left[1-\left(\frac{1+j}{1+i}\right)^n\right] & if \quad i \neq j \\ \frac{n}{1+j} & if \quad i = j \end{cases}$$

مثال 1.8

قرض لشراء منظومة شمسية بمبلغ 10,000 € وبتخفيض 20% على الدفعات. نسبة الفائدة على القرض 10% لمدة 10 سنوات. فإذا كانت نسبة الفائدة في السوق 8%، احسب دفعات القرض السنوية لقيمة الفائدة. ما هي القيمة الحالية لدفعات الفائدة السنوية.

الحل:

قيمة القرض 8,000 €، وهي القيمة الحالية الكلية لكل دفعات القرض. وبما أن الدفعات ثابتة على طول مدة القرض، فان الدفعة السنوية الثابتة للقرض تُحسب من المعادلة (4.8)

$$\text{القيمة السنوية للقرض} = \frac{\text{القرض الكلي}}{PWF(n=10, j=0, i=0.10)}$$

حيث:

$$PWF(n=10, j=0, i=0.10)=\frac{1}{i-j}\left[1-\left(\frac{1+j}{1+i}\right)^{n}\right]$$

$$=\frac{1}{0.10-0}\left[1-\left(\frac{1+0}{1+0.10}\right)^{10}\right]=6.145$$

وبهذا فان الدفعات السنوية للرهن تكون، $€1{,}302=\frac{8{,}000}{6.145}$

وتتضمن دفعات القرض الدفعة الأساسية والفائدة على القرض، وبهذا وكما يقل القرض الأساسي المتبقي الأساس، فان الفائدة تقل تبعاً.

للسنة الأولى:

دفعة الفائدة : $8{,}000\times0.10=800€$

الدفعة الأساسية : $1302-800=502€$

الباقي الأساسي في نهاية السنة : $8{,}000-502=7498€$

القيمة الحالية لدفعة الفائدة : $\frac{800}{1+0.08}=741€$

للسنة الثانية:

دفعة الفائدة : $7{,}498\times0.10=749.8€$

الدفعة الأساسية : $1302-749.8=552.2€$

الباقي الأساسي في نهاية السنة : $7{,}498-522.2=6945.8€$

القيمة الحالية لدفعة الفائدة : $\frac{749.8}{1+0.08}=643€$

بنفس السياق نجري الحسابات لكل السنوات الثمانية المتبقية، النتائج المتحصل عليها مدرجة في الجدول (2.8).

جدول (2.8) النتائج المحسوبة لمثال (1.8)

السنة	دفعة القرض €	دفعة الفائدة €	الدفعة الأساسية €	المتبقي الأساسي €	القيمة الحالية لدفعة الفائدة، €
1	1,302	800	502	7,498	741
2	1,302	750	522	6,946	643
3	1,302	695	607	6,339	552
4	1,302	634	668	5,671	466
5	1,302	567	735	4,936	386
6	1,302	493	809	4,127	311
7	1,302	413	889	3,238	241
8	1,302	324	978	2,260	175
9	1,302	226	1,076	1,184	113
10	1,302	118	1,184	0	55
	13,020	5,020	8,000		3,683

2.2.8 تحليل التوفير خلال دورة الحياة

التوفير خلال دورة الحياة (LCS) هو القيمة الحالية الصافية، والتي تمثل فرق تكاليف دورة الحياة (LCC) بين المنظومة التقليدية الغير شمسية والمنظومة الشمسية مع الطاقة الإضافية. تكلفة دورة الحياة لنظام، تُحدد بواسطة خصم الدفعات السنوية الصافية من القيمة الحالية للمنظومة وإيجاد مجموع هذه القيم الحالية. لدفعات سنوية متوالية منتظمة التغير، تكلفة دورة الحياة يمكن حسابها باستخدام المعادلة (4.8):

$$LCC = E\left[PWF(n, j, i)\right] \qquad (6.8)$$

حيث تمثل E السيولة المدفوعة في نهاية السنة الأولى، $PWF(n, j, i)$ – معامل القيمة الحالية كما هي معطاة في المعادلة (5.8)، والتي فيها n – عدد السنين، j – معدل التضخم، i – معدل الفائدة.

في تحليل دورة الحياة، القيمة الحالية لكل التكاليف، الحالية والمستقبلية، يحدد لكل الأنظمة البديلة تحت اعتبار، يتضمن الخيارات المختلفة للمنظومات الغير شمسية ولأنظمة الطاقة الشمسية مع الطاقة الإضافية. والنظام الذي يعطي أكبر توفير خلال دورة الحياة أو الأقل تكلفة لدورة الحياة سيكون النظام الأفضل اقتصادياً.

تكاليف دورة الحياة تتضمن كل من: رأس المال الابتدائي وتكاليف التشغيل السنوية. تكاليف دورة الحياة لأي نظام طاقة يُعرف بأنه مجموع مركبات التكاليف التالية خلال عمر النظام:

1. تكاليف شراء المعدات
2. تكاليف النقل والتركيب
3. تكاليف التشغيل ـ الوقود، ... إلخ
4. دفعات الفائدة، إذا تم اقتراض المال
5. الصيانة، التأمين
6. ضرائب الملكية والمبيعات
7. مصاريف أخرى مصاحبة للتشغيل
8. قيمة الأجهزة بعد استيفاء مدة العمر (سالبة القيمة)

على سبيل المثال تكاليف دورة حياة نظام تقليدي غازي لتسخين الهواء، يشتمل: تكلفة الفرن، أجهزة التوزيع والتحكم، التكلفة الكلية للغاز المحروق خلال فترة التحليل، الضرائب المفروضة على أنظمة التدفئة (إن وجدت)، أي مصاريف أخرى على الصيانة وقطع الغيار (مرشحات، مراوح، محركات، مخمدات)، وقيمة الفائدة على المبلغ المستثمر في شراء نظام التدفئة هذا. من الواضح أن تكلفة دورة الحياة مؤشر اقتصادي أكثر مدلولا من التكلفة الابتدائية لفرن حرق الغاز.

في هذا الجزء من الفصل، سنقوم بشرح مفصل رياضي عن المتغيرات التي تؤثر في تكلفة دورة الحياة للأنظمة الشمسية. هذه المتغيرات الهامة تتضمن:

- رأس المال، ويتضمن الأجهزة، النقل، التركيب، أجور مصممي المنظومة، أجار المبنى.
- معدل الفائدة على رأس المال المستثمر.
- زمن دورة الحياة (عمر النظام).
- معدل التهالك وقيمة المعدات المتهالكة.
- تكاليف قطع الغيار.
- تكاليف الصيانة.
- تكاليف الوقود (لأنظمة الطاقة الغير شمسية).
- معدل التضخم على الوقود.
- معدل التضخم العام.
- الضرائب.

1.2.2.8 تكاليف دورة الحياة لمنظومة شمسية

التكاليف الأساسية لمنظومة شمسية هي رأس المال والفائدة المطلوب دفعها على المعدات. في تحليل تكلفة دورة الحياة لمنظومة شمسية، فان تكلفة منظومة الطاقة الإضافية لا تُحسب ضمن التكاليف الأساسية للمنظومة الشمسية، لأن منظومة الطاقة الإضافية موجودة سواء استخدمنا أو لم نستخدم الطاقة الشمسية. والتوفير يتمثل في كمية النقود التي ستدفع لشراء الوقود التقليدي، وهذه القيمة ستدفع مقابل الاستثمار في شراء معدات الطاقة الشمسية، ومَن ثم الصيانة، الضرائب والتأمين. وتحليل تكلفة دورة الحياة، يتعامل مع التكاليف السنوية الكلية

خلال عمر المنظومة. من المناسب أيضاً، التعامل مع تكاليف دورة الحياة على أساس سنوي. كلتا الطريقتين متكافئتان، كما هو مبين في التحليل التالي، سنرمز للتكاليف السنوية (أو الدفعات السنوية P_{ann}) وللتكاليف الكلية S.

التكاليف الابتدائية للمنظومة الشمسية

التكاليف الابتدائية لمنظومة شمسية تتكون من عدة أجزاء، على سبيل المثال لمنظومة تدفئة، فان التكاليف الابتدائية غالباً ما تتمثل في التالي:

- المجمعات الشمسية: السعر، التسليم، ومتطلبات خاصة للتركيب.
- الخزان الحراري: السعر، ومتطلبات خاصة للتركيب.
- المضخات أو المراوح، الأنابيب، صمامات: التركيب.
- المبادلات الحرارية.
- أجهزة التحكم والتوزيع.
- أسلاك.
- قيمة الجزء المستخدم من المبنى لإقامة المنظومة الشمسية.
- هياكل إضافية لتركيب وتثبيت المجمعات الشمسية.
- الاختبارات والتأكد من عمل المنظومة.
- أجور العمال والفنيين.

كما يمكن تقسيم تكاليف المنظومة الشمسية إلى نوعين، إذا كانت التكاليف تعتمد على حجم المنظومة فتسمى التكاليف المتغيرة، على سبيل المثال، تكاليف المجمعات الشمسية، الخزان، المبادلات الحرارية، التأمين، الخ ... التكاليف الغير معتمدة على حجم المنظومة تُسمى بالتكاليف الثابتة، على سبيل المثال، أجهزة التحكم. العديد من التحاليل التجريبية والنظرية لأنظمة الطاقة الشمسية المخصصة للمباني، بينت أن أحجام معظم الأجزاء لها علاقة بمساحة المجمعات الشمسية

ومرتبطة بقواعد معينة. وبالتالي معظم التكاليف المتغيرة في المنظومة الشمسية يمكن أن يُعبر عنها بدلالة حجم أو مساحة المجمعات الشمسية، والتي بدورها تصبح مؤشراً واضحاً لحجم المنظومة الشمسية لمدى محدد.

بما أن مساحة المجمعات الشمسية تعتبر مقياس لحجم المنظومة، وبهذا فإنها (مساحة المجمعات الشمسية) تعتبر مقياس لحجم كل جزء في المنظومة. والتكاليف المتغيرة غالباً ما تُصاغ كقيمة نقدية لكل وحدة مساحة من المجمعات الشمسية. على سبيل المثال، الخزان، بينما يقاس حجمه بالوحدات الفيزيائية المعروفة kg أو m^3، ففي الأنظمة الشمسية عادة ما يقدر بالوحدات $\$/m_c^2$، الرمز السفلي c، يشير إلى المجمع الشمسي. التكاليف الثابتة لا تعتمد على حجم المنظومة وغالباً ما تُصاغ بوحدات كالدولار. والتكاليف الثابتة يمكن اعتبارها كتلك القيمة المطلوبة لشراء وتركيب منظومة شمسية بمساحة مجمعات شمسية متناهية الصغر، وتلك تُعطي طاقة صغيرة.

في معظم الحالات تُدفع التكاليف الابتدائية المدرجة أعلاه بواسطة المالك على أقساط شهرية أو سنوية. و يُحسب حجم الدفعات المتتالية بواسطة قيمة مناسبة لمعامل استرداد رأس المال CRF . حيث:

$$CRF(i,n)=\frac{i}{1-(1+i)^{-n}} \qquad (7.8)$$

هذه الدفعات المتوالية تجمع مع التكاليف المستقبلية المبينة أدناه والمتضمنة التكاليف السنوية الكلية للطاقة الشمسية.

التكاليف المستقبلية للمنظومات الشمسية

عوائد المنظومة خلال العمر المنتج للمنظومة الشمسية، تُسمى بالتكاليف المستقبلية، وتتضمن:

- صيانة، عمال، وموارد.
- ترميم.
- قطاع غيار.
- تكلفة الطاقة لتشغيل المضخات والمراوح وأجهزة التحكم.
- الضرائب والتأمين.

هذه التكاليف تتغير خلال دورة الحياة لمنظومة معرضة لضغوط التضخم والضرائب. وكل هذه التكاليف يجب تحويلها إلى قيمتها الحالية بواسطة القيمة المناسبة من معامل القيمة الحالية، PWF.

وتكاليف الصيانة والترميم تتغير تبعاً للتطبيق. والمنظومات الشمسية العاملة على درجات حرارة مرتفعة، تستخدم مجمعات تركيز متتبعة لحركة الشمس، ستتطلب صيانة وترميم أكثر من تلك العاملة على درجات حرارة منخفضة، كمنظومات تسخين المياه وتدفئة المباني، والتي تستخدم الهواء كمائع عامل ستتطلب قوة ضخ أكثر من تلك التي تستخدم الماء، وذلك بسبب قلة الحرارة النوعية للهواء نسبياً مقارنة بالماء، ويترتب على ذلك زيادة في معدل تدفق الهواء عنه في الماء.

تكاليف المنظومة الشمسية السنوية ـ التطبيقات المنزلية

التكلفة الكلية للطاقة الشمسية على أساس سنوي C_y، هي التكاليف الابتدائية الكلية والتكاليف الأخرى مُصاغة بصورة القيمة الحالية. التكاليف السنوية للطاقة الشمسية يمكن صياغتها بوحدة النقد، كالتالي (Kreith, Kreider, 1978):

(8.8)

$$C_y = C_{s,tot}\ CRF(i',n)$$ الاستثمار الابتدائي

$$- C_{s,salv}\ PWF(i',n)\, CRF(i',n)$$ قيمة المعدات المتهالكة

$+\left[\sum_{k=1}^{n} R_k \; PWF(i',k)\right] CRF(i',n)$	ترميم وإصلاح
$+C_e \dfrac{CRF(i',n)}{CRF(i'',n)}$	تكلفة الطاقة
$+T_{prop} \; C_{s,ass}$	ضرائب
$-T_{inc} \, T_{prop} \; C_{s,ass}$	العائد المعفي من الضرائب
$-T_{inc} \, i_m \left[\sum_k \dfrac{P_k}{(1+i')^k}\right] CRF(i',n)$	فائدة الضرائب المعفية
$+M$	الصيانة
$+I$	التأمين

حيث:

$C_{s,tot}$ = القيمة الابتدائية الكلية للاستثمار

$C_{s,salv}$ = قيمة المعدات المتهالكة في نهاية مدة التحليل

$C_{s,ass}$ = قيمة الضريبة على المنظومة الشمسية

C_e = تكلفة الطاقة لتشغيل المنظومة الشمسية

i' = معدل الفائدة الفعلي $i' = \dfrac{i-j}{1+j}$

i'' = معدل الفائدة على الطاقة $i'' = \dfrac{i-j_e}{1+j_e}$

i = معدل الفائدة على المال المستثمر

M = الصيانة

j = معدل التضخم العام

i_m = معدل الفائدة في السوق

j_e = معدل التضخم في الطاقة

k = السنة التي يتم فيها تبديل قطع أو عملية ترميم للمنظومة

I = التأمين

R_k = تكلفة تبديل القطع أو الترميم

P_k = القيمة المتبقية من المبلغ الكلي (قيمة غير مدفوعة)

n = زمن دورة حياة أو فترة التحليل للمنظومة

T_{prop} = معدل ضريبة الملكية

T_{inc} = معدل ضريبة على الدخل أو العائد

مجموع السبعة حدود في المعادلة (8.8) يمكن تقييمه بواسطة القيمة الأساسية المتبقية خلال السنة k:

$$P_k = C_{s,tot}\left[(1+i_m)^{k-1} + \frac{(1+i_m)^{k-1}-1}{(1+i_m)^{-n}-1}\right] \qquad (9.8)$$

وبالتالي، المجموع يُعطى بالعلاقة التالية:

$$i_m \sum_k \frac{P_k}{(1+i')^k} = C_{s,tot}\left\{\frac{'CRF(i_m,n)}{CRF(i',n)} + \frac{1}{1+i_m}\frac{1}{CRF(i'-i_m,n)}\left[i_m - CRF(i_m,n)\right]\right\} \qquad (10.8)$$

الحدود في المعادلة (8.8) تمثل نوعين من الدفعات الحقيقية، وهي تلك التي تبقى ثابتة مع الزمن والمتغيرة. على سبيل المثال، الصيانة، التأمين، الضرائب. إذا كان يتوقع حدوث تذبذب حقيقي، فإن هذه الحدود يمكن معاملتها كالطاقة في الحد الرابع للمعادلة (8.8). الاستثمار الابتدائي (الحد الأول) في المعادلة (8.8) يمثل قيمة القرض لشراء المنظومة الشمسية على أساس سنوي. وصولاً إلى نهاية الخدمة للمنظومة وقيمة المعدات المستهلكة (الحد الثاني) والذي يعتبر كرصيد ويخصم من القيمة الحالية للمنظومة باستخدام معامل القيمة الحالية PWF. الترميم والإصلاح R_k،

يمكن اعتبارها كدفعات متوالية، صغيرة وغير متكررة للمنظومات الجيدة التصميم، والتي تخصم من قيمتها الحالية باستخدام PWF للسنة k. ومتطلبات الطاقة (عادة فقط كهرباء) لتشغيل المنظومة الشمسية يمكن أن يتذبذب في السعر بمعدل j_e والتي تختلف عن معدل التضخم العادي j. وبهذا فان معاملات استرجاع رأس المال تتطلب تحديد القيمة الحالية الموازنة لطاقة التشغيل.

مثال 2.8

احسب التكلفة السنوية لمنظومة شمسية بالمواصفات التالية على مدى 15 سنة:

سعر المنظومة الشمسية	$ 8,000
قيمة المعدات المتهالكة	$ 0
قيمة الضرائب	$ 4,000
معدل الفائدة الفعلي	$i' = 0.02$
معدل الفائدة الفعلي على الطاقة	$i'' = -0.02$
معدل الفائدة في السوق	$i_m = 0.10$
ترميم، مرة واحدة بسعر 200 $ في السنة العاشرة	$R_{10} = 200\$;\quad R_{k\neq10} = 0\$$
الصيانة والتأمين	مهمل
ضرائب	$T_{prop} = 0\%$
ضرائب على العوائد	$T_{inc} = 25\%$
الطاقة الكهربائية	$C_e = 20\ \$/year$

الحل:

كل حد في المعادلة (8.8) بين بوضوح في الجدول أسفله. معاملات استرجاع رأس المال ومعاملات القيمة الحالية، تُحسب أولاً:

$$CRF(i',n) = CRF(0.02, 15) = 0.0778$$

$$CRF(i'',n) = CRF(-0.02, 15) = 0.0565$$

$$PWF(i',n_k) = CRF(0.02, 10) = 0.820$$

الحد	الصيغة الرياضية	القيمة $
القيمة الإضافية السنوية	$C_{s.tot}\ CRF(i', n)$	622.40
قيمة المعدات المستهلكة	$C_{s.salv}\ (=0)$	0
ترميم	$R_{10}\ PWF(i', 10)\ CRF(i', n)$	12.76
طاقة كهربائية	$C_e \dfrac{CRF(i', n)}{CRF(i'', n)}$	27.53
ضرائب		0
رصيد الفائدة [استخدام المعادلة (8.8)]	$T_{inc}\ i_m\ CRF(i', n) \sum \dfrac{P_k}{(1+i')^k}$	-124.16
التأمين الصيانة	$I = M = 0$	0
		538.53

تكلفة المنظومة الشمسية السنوية C_y، هي 538.53 $.

في العديد من الحالات تدفع دفعة مقدماً D_s على حساب المنظومة الشمسية لتخفيض قيمة الرهن. السعر السنوي للمنظومة الشمسية يمكن تعديله ليشمل الدفعة المقدمة D_s بواسطة تغيير الحد الأول في المعادلة (8.8)، على النحو التالي:

$$(C_{s,tot} - D_s)\,CRF(i', n) + \frac{D_s\ i'}{(1+i')^n - 1} \qquad (11.8)$$

بنفس السياق، فإن حسم الضرائب (الحد السابع) في المعادلة (8.8) يغير من $C_{s,tot}$ إلى $(C_{s,tot} - D_s)$.

مثال 3.8

إذا دفع مالك المنزل في المثال السابق دفعة مقدمة 1,000 $. كم سيقلل هذا الاجراء التكاليف السنوية للمنظومة الشمسية بسبب توفير الفائدة على الرهن.

الحل:

الاختلاف بين الحدين في المعادلة (11.8) يمثل الاختلاف في التكاليف السنوية.

من المثال السابق:

$$C_{s,tot}\ CRF(i', n) = 622.40\ \$$$

إذا ما تم دفع 1,000 $ مقدماً، فإن القيمة السابقة للتكلفة السنوية تصبح:

$$\left(C_{s,tot} - D_s\right) CRF(i', n) + \frac{D_s\ i'}{(1+i')^n - 1} = 544.6 + 57.83 = 602.43\ \$$$

والاختلاف في القيمتين هو 19.97 $. إضافة إلى أن رصيد الضرائب السنوية سيقل إلى 108.64 $. وبالتالي الدفعة السنوية الصافية تصبح 534.08 $.

3.8 الحجم المثالي للمنظومة الشمسية

الحجم المثالي للمنظومة الشمسية يتطلب بأن تكون كل أجزاء المنظومة ذات أحجام بحيث تكون الطاقة المتحصل عليها المشتركة (من النظام الشمسي مع النظام الإضافي التقليدي) أقل ما يمكن، للتطبيق المدروس. في الأجزاء السابقة من هذا الفصل تمت مناقشة طرق حساب التكلفة السنوية للمنظومة السنوية بالتفصيل. في هذا الجزء سندرس كيفية تعيين الحجم الأمثل للمنظومة الشمسية بحيث يكون سعر الطاقة المنتجة أقل ما يمكن (Duffie, Beckman, 1991).

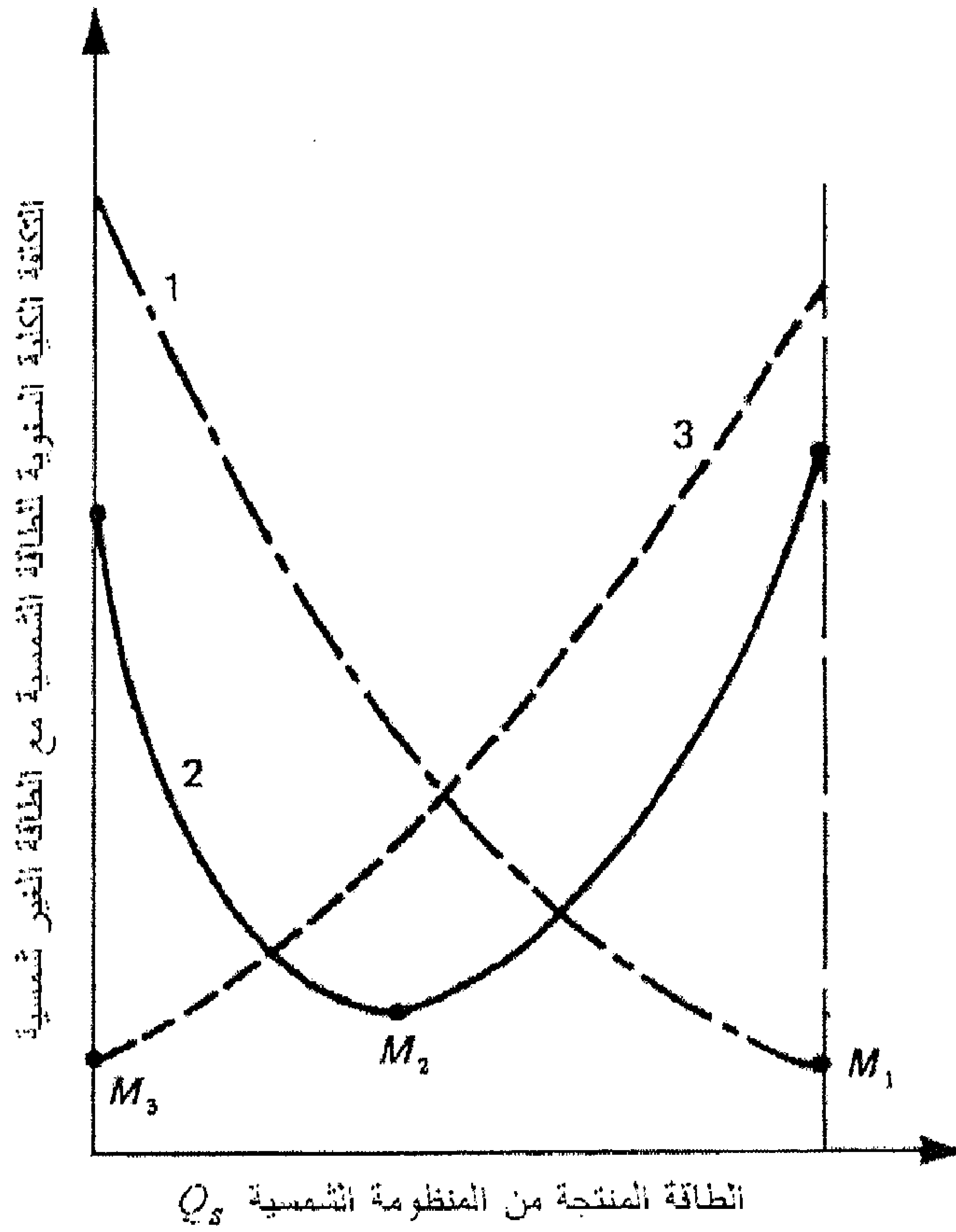
1.3.8 تحليل التكلفة الهامشية

الحجم المثالي للمنظومة الشمسية، والتي تكون فيها التكلفة السنوية للطاقة (المنظومة الشمسية مع المنظومة الإضافية) أقل ما يمكن. الكلفة السنوية الكلية C_T، يمكن صياغتها على النحو التالي:

$$C_T = C_y(Q_s) + C_a(Q_a) \qquad (12.8)$$

حيث: يمثل الحد الأول، $C_y(Q_s)$، التكلفة السنوية للطاقة الشمسية [معادلة (8.8)]؛ بينما يمثل الحد الثاني $C_a(Q_a)$ التكلفة السنوية للطاقة الغير شمسية. ويفترض أن تعتمد كلتا الكلفتين على كمية الطاقة المنتجة من المنظومة الشمسية. وهذا دائماً حقيقي للأنظمة الشمسية ولمصادر الطاقة الغير شمسية أيضاً. إن ثلاث منحنيات للتكلفة مبينة في الشكل (1.8). والمنحنيات الثلاثة تمثل ثلاثة أنواع من التكاليف تنتج من عدة شروط كالتالي:

1. تكاليف مرتفعة للطاقة الغير شمسية، و/ أو معامل تغطية الحمل للمنظومة الشمسية مرتفع (منحنى 1)، المنظومة الشمسية الأكبر يمكن أن تكون الأمثل.
2. متوسط أو اشتراك نموذجي من تكلفة الطاقة، الطاقة الشمسية والاستهلاك (منحنى 2).
3. تكاليف الطاقة الغير شمسية قليلة، و/ أو معامل تغطية الحمل للمنظومة الشمسية منخفض (منحنى 3)، الخيار الأمثل يكون لصالح المنظومة الغير شمسية.



شكل (1.8) منحنيات التكلفة السنوية للطاقة الشمسية مع الطاقة الغير شمسية. أقل تكلفة عند M. المنحنيات 1 و 3 تمثل حدود التكلفة للخيارين، الحدود تمثل أقصى وأقل طاقة شمسية منتجة لتطبيق معين (M_3 يمثل بصورة طبيعية الخيار التقليدي للطاقة أي بدون طاقة شمسية أو بمساحة مجمعات شمسية مساوية للصفر)

قيمة تكلفة الطاقة الغير شمسية $C_a(Q_a)$، في المعادلة (12.8)، تمثل تكلفة الوقود المستوية على مدى دورة حياة المنظومة. بما أنه لا يمثل تكلفة أي سنة مفردة خلال دورة الحياة، فإنه يمثل التكلفة الكلية خلال دورة الحياة بالقيمة الحالية السنوية بواسطة معامل استرجاع رأس المال $CRF(i', n)$. ويُعطى رياضيا على شكل الحد الرابع (الغير شمسية) في معادلة التكاليف السنوية للطاقة الشمسية

[معادلة (8.8)]. المقدار C_e في المعادلة (8.8) يمكن اعتباره في التحليل الحالي بأنه يمثل تكلفة وقود التغذية للسنة الأولى من فترة التحليل. في معظم التحاليل الاقتصادية، عادة ما يُفرض أن كمية الوقود الموفرة عن طريق استخدام الطاقة الشمسية لكل سنة لها نفس القيمة، فقط قيمتها النقدية تزداد سنة بعد أخرى بتأثير التضخم في سعر الوقود.

الحجم المثالي للمنظومة مقيد بمعادلة التكاليف السنوية الكلية التالية:

$$Q_T = Q_s + Q_a \tag{13.8}$$

حيث: Q_T – الاستهلاك الكلي من الوقود، والذي يتم تعويض جزء منه بالطاقة الشمسية Q_s، والمتبقي Q_a يُغطى باستخدام المنظومة الغير شمسية. المعادلة (12.8) يمكن حلها باستخدام مضروب Lagrange λ، كالتالي:

$$C_T = C_y(Q_s) + C_a(Q_a) + \lambda\left(Q_T - Q_s - Q_a\right) \tag{14.8}$$

والمطلوب الآن إيجاد نقطة الركود للمعادلة (14.8)، وهي النقطة التي يكون عندها $dC_T = 0$:

$$dC_T = \frac{dC_y}{dQ_s}dQ_s + \frac{dC_a}{dQ_a}dQ_a + \lambda\left(-dQ_s - dQ_a\right) = 0 \tag{15.8}$$

وبما أن التفاضلين dQ_a , dQ_s غير مشروطين، وبالتالي يمكن اعتبارهما صفراً، للحصول على:

$$\frac{dC_y}{dQ_s} = \frac{dC_a}{dQ_a} = \lambda \tag{16.8}$$

المعادلة (15.8) تُشير إلى أن التكلفة السنوية الأصغر تحدث عند نقطة، بحيث

تكاليف الطاقة الهامشية لكلا المصـدرين تكـون متسـاوية. هـذا الشـرط يعـني أن الاستثمار في أي منظومة شمسية يجب أن يستمر حتـى النقطـة الـتي عنـدها أخـر دولار مستثمر يولد تماماً 1 $ في توفير الطاقـة الغـير شمسـية. شـكل (2.8) يـبين التحليل السابق بيانياً. عند النقطة التي فيها منحنيـات التكلفـة للطاقـة الشمسـية والغير شمسية يكون لهما نفس الميل، التكاليف الهامشية تكون متساوية وهذا هـو المطلوب للنظام الأمثل.

عند أي نقطة بـين A، B في الشـكل (2.8)، المصـدر الشمسـي يمثـل البـديل الأقل تكلفة عنه للمصدر الغير شمسي. هذا يعني أنه، عند أيـة نقطـة بـين A، B فإن مالك المنظومة الشمسية يوفر نقوداً ووقوداً بمقابل بديل غير شمسي بالكامل. النقطة M هي أفضل أقل تكلفة. فإذا كان الهدف من السياسة الاقتصادية التقليل من مقدار استخدام الطاقة الغير شمسية إلى أقصى حد بدفع نفس التكلفة السنوية الكلية للطاقة، فان النقطة B هي نقطة التصميم. في الحقيقة النقطة M (نقطة أقـل تكلفة)، تمثل سلوكاً معقولاً للمستهلكين، والنقطة M تشير إلى التصميم الأمثـل. أما إذا لم يتقاطع منحنى الطاقة الشمسية أو لم يتمـاس مـع منحنـى الطاقـة الغـير شمسية في الشكل (2.8 – أ)، فمعنى ذلك إنه لا يوجد أي حافز اقتصادي لاعتبار الطاقة الشمسية.

مثال 4.8

عائلة تستهلك من الطاقة سنوياً 70 GJ للتسـخين. ويشـير نظـام حاسـوب لمحاكـاة منظومة شمسية لهذا المبنى إلى أن دالة التكلفة السنوية للمنظومة الشمسـية سـتكون على الصورة:

$$C_y = 400 - 20\, Q_s + 0.4\, Q_s^2 \qquad (20 < Q_s < 70) \qquad (1)$$

حيث: Q_s بوحدات (GJ)، C_y بوحدات ($). يعتبر النفط مصدر الطاقة الغير شمسي للمبنى، ودالة التكلفة له على الصورة التالية:

$$C_a = 5\,Q_a \qquad (2)$$

حيث: Q_a بوحدات (GJ). أحسب حجم الاشتراك الأمثل للطاقة الشمسية والغير شمسية.

الحل:

الجزء الأمثل الذي تغطيه الطاقة الشمسية من حمل المبنى يُحدد بواسطة معادلة التكاليف الهامشية للطاقة الشمسية MC_s والوقود MC_a. من المعادلة (1) و (2).

$$MC_s = \frac{dC_y}{dQ_s} = -20 + 0.8\,Q_s \qquad (3)$$

$$MC_a = \frac{dC_a}{dQ_a} = 5 \qquad (4)$$

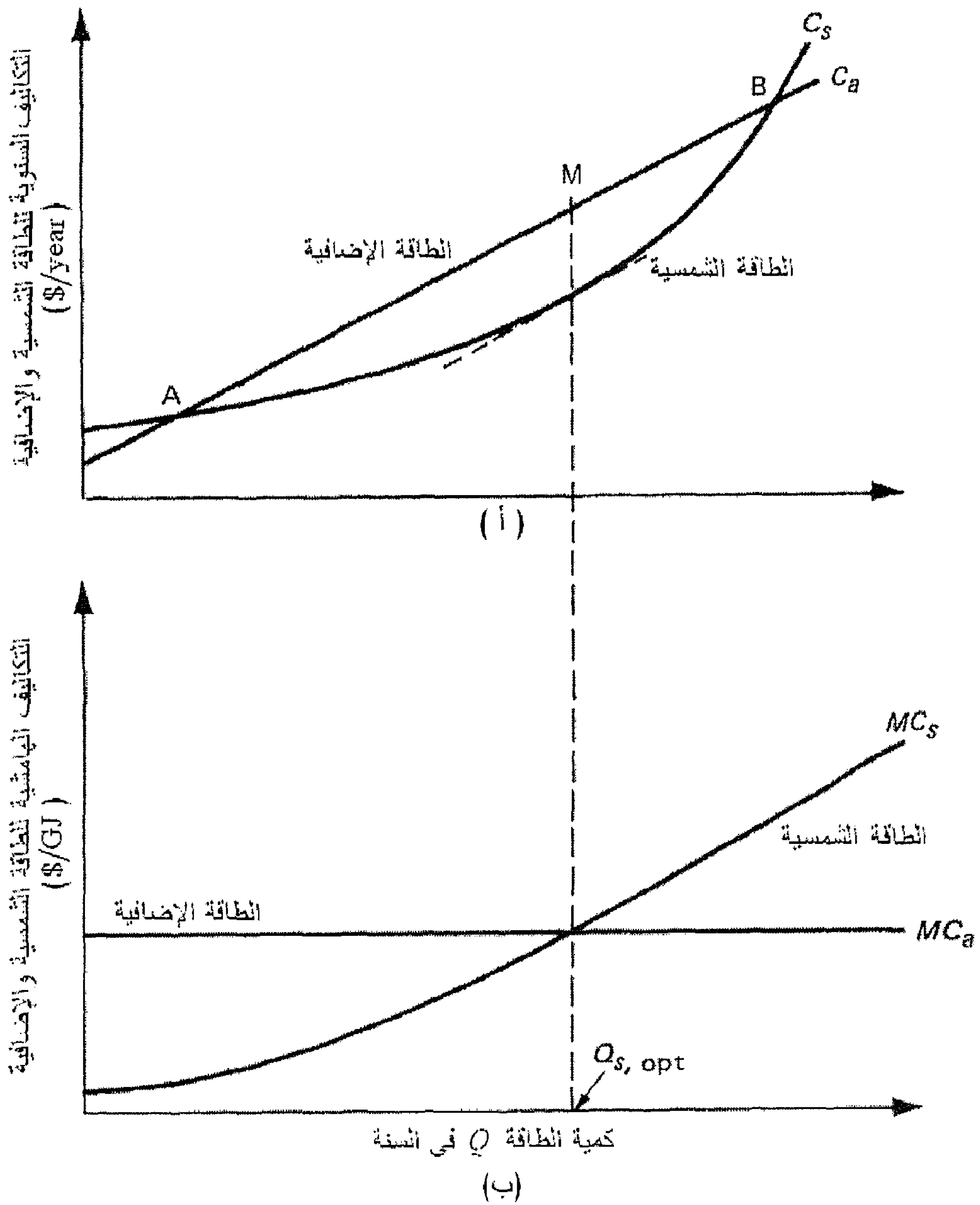
بمساواة المعادلتين (3 و 4) للحصول على Q_s المثالية:

$$-20 + 0.8\,Q_s = 5$$

$$Q_s = 31\ \text{GJ}$$

وبالتالي فان معامل التغطية من قبل الطاقة الشمسية f:

$$f_s = \frac{31}{70} = 0.44$$ ◁



شكل (2.8) تحديد الحجم المثالي لمنظومة شمسية: (أ) التكاليف السنوية الكلية للطاقة الشمسية والغير شمسية، (ب) منحنيات التكاليف الهامشية للطاقة الشمسية والغير شمسية المبينة للحجم المثالي للمنظومة عند تقاطع منحنيات التكاليف الهامشية

2.3.8 تبسيط التحليل الاقتصادي

في معظم تحليلات الطاقة الشمسية، من الممكن تبسيط الطريقة السابقة. كما تم ذكره في الجزء السابق، تعتبر مساحة المجمعات الشمسية، مؤشر يعتمد عليه والـذي بواسطته يمكن تحديد حجم وكلفة كافة العناصر الأخرى في المنظومة الشمسية. ومعادلة التكلفة (13.8) يمكن تحديدها مباشرة بواسطة عكس تقنية دالة الإنتاج، كما هو مبين أدناه. فإذا كانت دالة الإنتاج معطاة كالتالي:

$$Q_s = f(X_1, X_2, ...) \qquad (17.8)$$

إذن يمكن تبسيطها إلى الصورة:

$$Q_s = f(A_c) \qquad (18.8)$$

كلفة المنظومة الشمسية، بالمثل، يمكن أن تصبح دالة في مساحة المجمعات الشمسية على الصورة:

$$C_y = c_y\ A_c + C_f \qquad (19.8)$$

حيث: c_y - كلفة الطاقة الشمسية على وحدة مساحة المجمعات الشمسية، C_f - التكاليف الثابتة. الجزء الغير شمسي من دالة التكاليف يمكن أيضاً أن تُقدم كدالة في مساحة المجمعات الشمسية، كالتالي:

$$C_a = p(Q_a) \qquad (20.8)$$

وبهذا:

$$C_a = p(Q_T - Q_s) = q(Q_s) \qquad (21.8)$$

حيث: Q_T، تمثل الطاقة السنوية الكلية المستهلكة. باستخدام المعادلة (18.8):

$$C_a = q[f(A_c)] = h(A_c) \qquad (22.8)$$

بتجميع C_y و C_a في صيغة التكاليف الكلية C_T:

$$C_T = g(A_c) + h(A_c) \tag{23.8}$$

أو:

$$C_T = F(A_c) \tag{24.8}$$

الحجم الأمثل للمنظومة الشمسية يمكن تحديده مباشرة بواسطة تفاضل المعادلة (24.8) بالنسبة إلى A_c ، للحصول على المعايير للحجم المثالي التالية:

$$F'(A_{c,opt}) = 0 \tag{25.8}$$

والمعرض إلى:

$$F''(A_{c,opt}) > 0 \tag{26.8}$$

والخاضع إلى:

$$C_T(A_{c,opt}) < C_T(A_{c,\max}) \tag{27.8}$$

$$C_T(A_{c,opt}) < C_T(A_{c,\min}) \tag{28.8}$$

حيث: $A_{c,\max}$ ، $A_{c,\min}$ القيم المتطرفة لنطاق مساحة المجمعات الشمسية. من الضروري اختبار نقاط النهاية، حيث يمكن أن يكون لمنحنى التكاليف حدوداً دنيا في بعض الحالات، كما هو مبين في الشكل (1.8). والمثال التالي يوضح كيفية استخدام هذه التقنية مباشرة للحصول على المساحة المثالية للمجمعات الشمسية.

مثال 5.8

دالة إنتاج الطاقة الشمسية لمبنى معطاة بالعلاقة التالية:

$$Q_s = 35\sqrt{A_c} \tag{1}$$

حيث: A_c ، مساحة المجمعات الشمسية بالمتر المربع $(350 > A_c > 50 \quad m^2)$. إذا كانت الكلفة السنوية للمنظومة الشمسية c_y لكل متر مربع 10 $. أوجد الحجم

الأمثل للمجمعات الشمسية. الطاقة المستهلكة السنوية 650 GJ وتكلفة مصدر الطاقة الغير شمسية $c_a = 8\ \$/\mathrm{GJ}$.

الحل:

دالة كلفة الطاقة الشمسية C_y:

$$C_y = c_y\ A_c = 10\ A_c$$

لاحظ أن الكلفة السنوية $c_y = 10$ على أساس الكلفة الابتدائية $150\ \$/\mathrm{m}^2$ والمضروب السنوي [معادلة (8.8)] 0.0667.

دالة كلفة المصدر الغير شمسي، تحسب من المعادلة (21.8) و (22.8):

$$\begin{aligned} C_a &= c_a\left(Q_T - Q_s\right) \\ &= 8\left(650 - 35\sqrt{A_c}\right) \end{aligned}$$

دالة الكلفة الكلية C_T هي:

$$\begin{aligned} C_T &= C_s + C_a \\ &= 10\ A_c - 280\ \sqrt{A_c} + 5200 \end{aligned} \qquad (2)$$

معادلة (2) يجب أن تفاضل بالنسبة للمتغير A_c وتعادل بالصفر لإيجاد المساحة المثالية:

$$\frac{dC_T}{dA_c} = 10 - \frac{280}{2}\frac{1}{\sqrt{A_{c,opt}}} = 0$$

حل المعادلة السابقة للحصول على $A_{c,opt}$:

$$A_{c,opt} = 196\ \mathrm{m}^2$$

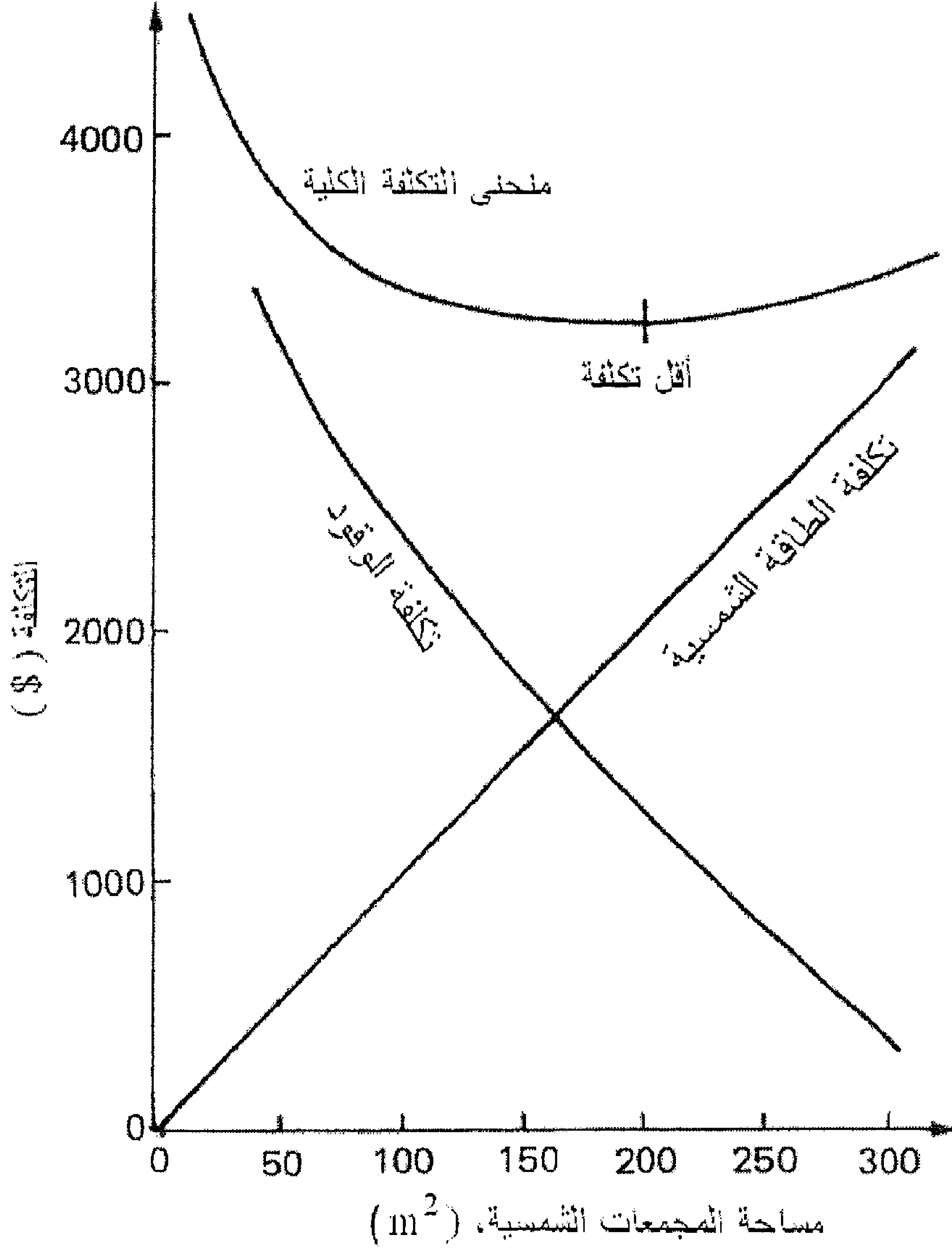
معادلة (1) تجيز حساب الطاقة الشمسية المنتجة:

$$Q_s = 35\ \sqrt{196} = 490\ \mathrm{GJ}$$

وبالتالي فان معامل التغطية من قبل الطاقة الشمسية f:

$$f_s = \frac{490}{650} = 0.75 \qquad \triangleleft$$

منحنى الكلفة الكلية للمثال مبين في الشكل (3.8) بتوضيح نقطة أقل تكلفة.



شكل (3.8) منحنيات التكلفة للمنظومة الشمسية المستخدمة في المثال 5.8. منحنى الكلفة الكلية يمثل مجموع منحنيات تكلفة الطاقة الشمسية وتكلفة الوقود

مثال 6.8

أحسب السيولة النقدية السنوية لمنظومة تسخين شمسية تزود مبنى بالطاقة الحرارية بمعدل 100 GJ/year . الكلفة الابتدائية للنظام 6,500 $، يدفع المالك ضريبة الملكية وهي 25% من قيمة المنظومة سنوياً. معدل الفائدة على القرض i_m، 10% لمدة 15 سنة، أهمل تكاليف الصيانة والتأمين. تكاليف الوقود 5 $/GJ ومعرضة للزيادة بمعدل 12% سنوياً. قارن الكلفة السنوية لكل من الطاقة الشمسية والطاقة التقليدية.

الحل:

السيولة النقدية السنوية مجدولة أدناه. الدفعات السنوية تكون:

$$CRF(0.10, 15)\times 6{,}500 = 854{,}58\ \$$$

الدفع على الوقود لتغطية الحمل بالكامل في السنة الأولى يكون:

$$100\ \text{GJ}\times 5\ \$/\text{GJ} = 500\ \$/\text{year}$$

هذه القيمة معرضة للتضخم سنوياً بمعدل 12%. في الجدول أسفله، ملخص للسيولة النقدية للسنوات العشر الأولى من القرض.

الجدول يبين أن المالك لا يربح (توفير الوقود التقليدي من استخدام الطاقة الشمسية) حتى السنة الخامسة، عندها يصبح التضخم في سعر الوقود أعلى من سعر المنظومة الشمسية الثابتة. في غضون سنة أو اثنتين بعد السنة الخامسة فان كمية الوقود المقتصدة من الطاقة الشمسية لا يمكن إهمالها وذلك بسبب التضخم في سعر الوقود. ويجب عمل مثل هذه الحسابات كي تتوضح الصورة النقدية للمالك. وبدون فرضيات لتبسيط المسألة، فانه من الصعوبة إنجاز الحسابات السابقة في صورتها الرياضية العامة لإيجاد نقطة الانقلاب في السيولة النقدية (أي بمعنى المدفوع السنوي الكلي على الطاقة الشمسية أقل من ذلك المدفوع على الطاقة التقليدية).

الجدير بالذكر أن هذه المؤشرات الاقتصادية مثل مدة استرجاع رأس المال، العائد من الاستثمار، مدة تغلب كلفة الوقود السنوي على الطاقة الشمسية، مؤشرات غير كافية وغير صحيحة لاستخدامها لاختيار المنظومة الشمسية المثالية. هذه المؤشرات، في أحسن الظروف، تعتبر طريق لجؤ حدسية وذلك بسبب بساطتها.

جدول يبين السيولة النقدية للمثال (6.8)

الكلفة السنوية للطاقة الشمسية $CRF \times C_{s,tot}$ (1)	القيمة الأساسية المتبقية P_k (2)	الفائدة $i_m P_k$ (3)	الدفعة الأساسية [(2)-(1)] (4)	رصيد الضرائب $i_m T_{inc} P_k$ (5)	كلفة الطاقة الشمسية [(5)-(1)] (6)	كلفة الوقود التقليدي (7)
854.58	6500.00	650.00	204.58	162.50	692.08	500.00
854.58	6295.42	629.54	225.04	157.39	697.19	560.00
854.58	6070.38	607.04	247.54	151.76	702.82	627.20
854.58	5822.84	582.28	272.30	145.57	709.01	702.46
854.58	5550.54	555.05	239.53	138.76	715.82	786.76
854.58	5251.01	525.10	329.48	131.28	723.30	881.17
854.58	4921.53	492.15	362.43	123.04	731.54	989.91
854.58	4559.10	455.91	398.67	113.98	740.60	1105.34
854.58	4160.43	416.04	438.54	104.01	750.57	1237.98
854.58	3721.89	372.19	482.39	93.05	761.53	1386.54

3.3.8 ملخص تقنية حساب الحجم المثالي للمنظومات الشمسية

طريقة الحجم المثالي الموصوفة في هذا الفصل يمكن تلخيصها في عدة نقاط والتي يجب إتباعها للتأكد من الحجم المناسب بتكلفة مثالية للمنظومة الشمسية. هذه الخطوات هي:

1. إنشاء دالة الإنتاج لمدى معين من أحجام العناصر الأساسية في المنظومة

الشمسية. حدد الكلفة السنوية لكل تركيبة باستخدام تحليل السيولة النقدية. الطاقة المتحصل عليها Q_s من دالة الإنتاج عادة ما توجد باستخدام النماذج الرياضية والتجريبية وأنماط الحل المختلفة (كما سيأتي ذكره في الفصل العاشر).

2. أنشاء دالة الإنتاج للمنظومة الإضافية الغير شمسية.
3. أحسب التكاليف الهامشية من دوال الإنتاج للمنظومات الشمسية والتقليدية. وازن التكاليف لتعيين الكمية المثالية من الإمداد الطاقي الشمسي. الجزء من الحمل المغطى بواسطة المصدر التقليدي (الغير شمسي) سيكون الباقي من الفرق بين الحمل الكلي و الجزء الشمسي.

4.8 التحليل البيئي

مصادر الطاقة تشتمل كافة أنواع الوقود والتي تستخدم لأغراض التسخين، توليد الكهرباء، المواصلات وبعض المتطلبات الأخرى من صور الطاقة. هذه المصادر يمكن أن تأخذ شكل الوقود الأحفوري أو مصادر الطاقة المتجددة. حوالي 75% من اجمالي الطاقة الكهربائية المتولدة في العالم ناتجة من حرق الوقود الاحفوري، منها 20% من الفحم، 35% من النفط وحوالي 20% من الغاز الطبيعي (Pervaiz, 2003). إن تحويل الوقود الأحفوري إلى طاقة كهربائية يؤدي إلى تأثيرات مباشرة وغير مباشرة على البيئة، والتي بدورها تفرض تبعات مالية، ومع ذلك، فان سعر الطاقة الكهربائية في العالم، لم يتضمن تكلفة الضرر البيئي الناتج من إنتاج الطاقة الكهربائية. في هذا الجزء من الفصل سوف نتناول التأثيرات البيئية على سعر الطاقة الكهربائية.

يواجه الوقود الأحفوري الذي يغذي التطور الاقتصادي المذهل خطرين، أولهما: خطر نضوب الوقود الأحفوري قريباً. أما الخطر الثاني فيتمثل في خطر التلوث البيئي بسبب نقل الوقود الأحفوري وبواسطة حرق منتجاته. وتقنيات

استخلاص الوقود الاحفوري، المواصلات، العمليات الصناعية وعملياً كلها تنتهي بالحرق، هذه التقنيات لها ضرر بليغ على البيئة، والتي تسبب تأثيرات سلبية مباشرة وغير مباشرة على الاقتصاد. مناجم الفحم تدمر الأرض، وتصبح غير مستخدمة لعدة سنوات. خلال استخلاص، نقل وتخزين النفط والغاز، يحدث التناثر والتسرب، وهذا يسبب تلوث الهواء، والماء والتربة. عمليات التكرير أيضاً لها ضرر بيئي. ومع ذلك فان معظم الضرر البيئي للوقود الأحفوري يحدث نتيجة استهلاكه الأخير بالحرق، وبصرف النظر عن الغرض النهائي (التسخين، إنتاج الكهرباء أو الطاقة الميكانيكية للنقل). والتركيب الرئيسي للوقود الأحفوري هو الكربون والهيدروجين، ولكنه يحتوي أيضاً على بعض المركبات العضوية الأخرى مثل الكبريت، أو على مركبات تضاف إليه أثناء عملية التكرير كالرصاص والكحول. احتراق الوقود الاحفوري ينتج عنه غازات عديدة مثل (CH_n, NO_x, SO_x, CO_x)، سخام ورماد، القطران، وبعض المركبات العضوية والتي كلها تُطلق في الجو وتسبب تلوث الهواء.

تلوث الهواء والذي يمكن تعريفه على أنه وجود بعض الغازات والأجسام والتي ليست من المركبات الطبيعية للهواء الجوي، أو حتى وجود المركبات الطبيعية بتراكيز أعلى من المستوى العادي. وتلوث الهواء يسبب ضرراً لصحة الإنسان، الحيوان، المحاصيل الزراعية، المنشآت والمباني، يقلل الرؤية ... إلخ (Richter, et al., 1981). وعندما يمر الإشعاع الشمسي خلال الهواء الجوي أو يختلط بالماء ومركبات الهواء الجوي الأخرى، يمكن أن تتغير الحالة الابتدائية للملوثات السابقة الذكر وذلك عن طريق تعرضها لتفاعلات كيميائية، تغير من تركيبها وتصبح ملوثات ثانوية، مثل الأزون، ترسبات الكبريت وأكاسيد النيتروجين، والتي تتحلل في السحب وماء المطر وتكون الأحماض الكبريتية والنيتريتية، والمسماة بالأمطار الحامضية، وأيضاً الضباب الحامضي والثلج الحامضي. ويتفاعل ثاني أكسيد الكربون مع الماء وينتج حامض

كربونيك مخفف. والترسبات الحامضية (رطبة أو جافة) تسبب حموضة في الماء والتربة، وينتج عنها خلل في النظام البيئي المائي والأرضي. النواتج المنبعثة من احتراق الوقود الاحفوري في الهواء الجوي، على الأغلب ثاني أكسيد الكربون مع ما يسمى بالغازات الدفيئة (الميثان، أكاسيد النيتروجين والكلوروفلوروكربونات)، المسببة للتغيرات الحرارية بواسطة امتصاص الأشعة تحت الحمراء، وتسبب ارتفاعاً في درجة حرارة الأرض. وتأثيرات ارتفاع درجة حرارة الأرض تتمركز في ذوبان الجبال الجليدية، ارتفاع مستوى ماء البحر والتغيرات المناخية، والتي تشمل موجات الحرارة، الجفاف، العواصف القوية، حرائق الغابات، الفيضانات (Saifur, Arnulfo, 1995).

1.4.8 إجراءات تحديد تكلفة ضرر البيئة

لتقييم الضرر وكلفة الدمار من الملوثات، فنحن بحاجة إلى تحليل مسار الضرر، وتتبع الممرات التي يسلكها الملوث من مصدر إنتاجه إلى المنطقة المصابة المتضررة. والخطوات الأساسية لهذا التحليل يمكن تلخيصها بالنقاط التالية :(Zwaan, Rabl, 2003)

- **الانبعاث**: تحديد التقنيات ذات العلاقة بالموضوع وأثر ذلك على البيئة (على سبيل المثال 1 كيلوجرام NOx لكل TWh المنبعث من محطة قدرة كهربائية لمدينة معينة وارتفاع مدخنة المحطة).
- **التشتت**: حساب ارتفاع نسبة تركيز الملوثات في كافة المناطق الملوثة. (على سبيل المثال التركيز الجزئي للأزون، وذلك باستخدام أنماط التشتت الجوي والكيميائي لتكون الأزون نتيجة أكاسيد النيتروجين NOx).
- **الضرر**: حساب الأضرار (الخراب بوحدات فيزيائية محسوسة) الناجم من التلوث، باستخدام دالة الفعل – الاستجابة، (على سبيل المثال، حالات الإصابة بداء الربو نتيجة لزيادة غاز الأزون في الهواء الجوي).

- **التكلفة**: تقييم مالي لهذه الأضرار (على سبيل المثال، تكلفة علاج داء الربو)، تجمع تكلفة الأضرار لكافة الأنواع التي نهتم بدراستها. والجدول (2.8) يبين تكلفة الأضرار لكل نوع بالدولار الأمريكي (باعتبار السنة المرجعية هي 1998). ويمكن ملاحظة أن الضرر البيئي يكلف 14.51 $ لكل جيجاجول طاقة منتجة من الفحم، 12.52$ لكل جيجاجول نفط و 8.26$ لكل جيجاجول من الغاز الطبيعي، ومتوسط الضرر في العالم حوالي 12.05$ لكل جيجاجول طاقة من الوقود الأحفوري (Veziroglu, 2001).

جدول (2.8) تكلفة الضرر البيئي الناجم من حرق عدة أنواع من الوقود الأحفوري.

نوع الضرر	الضرر البيئي ($ لكل جيجاجول)*					
	الفحم		النفط		الغاز الطبيعي	
	الضرر النوع	المجموع الكلي	الضرر النوع	المجموع الكلي	الضرر النوع	المجموع الكلي
التأثير على البشر		**5.16**		**4.19**		**3.09**
الموت بالحوادث	1.75		1.42		1.05	
مصاريف صحية	1.75		1.42		1.05	
هبوط كفاءة العمل	1.66		1.35		0.99	
التأثير على الحيوانات		**0.75**		**0.63**		**0.45**
نفوق الحيوانات الداجنة	0.25		0.21		0.15	
نفوق الحيوانات البرية	0.50		0.42		0.30	
التأثير على النباتات والغابات		**1.99**		**1.61**		**1.20**
انخفاض المحصول – الأزون	0.25		0.21		0.15	
انخفاض المحصول – الأمطار الحامضية	0.13		0.10		0.07	
التأثير على النباتات الأقليمية الموسمية	0.77		0.62		0.46	
انحسار الغابات (قيمة اقتصادية)	0.27		0.22		0.16	
انحسار الغابات (قيمة بيولوجية)	0.53		0.43		0.33	
خسارة أماكن الاستجمام	0.04		0.03		0.03	

نوع الضرر	الضرر البيئي ($ لكل جيجاجول)*					
	الفحم		النفط		الغاز الطبيعي	
	الضرر النوع	المجموع الكلي	الضرر النوع	المجموع الكلي	الضرر النوع	المجموع الكلي
التأثير على النظام البيئي المائي		**0.26**		**1.55**		**0.16**
بقع النفط المتناثرة	–		0.44		–	
التسرب من الخزانات التحت مائية	–		0.90		–	
بحيرات الكلس	0.04		0.03		0.03	
خسارة التكاثر في الأسماك	0.04		0.03		0.03	
التأثير على التنوع البيولوجي	0.18		0.15		0.10	
التأثير على المنشئات الصناعية		**1.66**		**1.34**		**0.98**
ضرر الآثار والمباني التاريخية	0.18		0.15		0.10	
ضرر المباني والمنازل	0.37		0.30		0.22	
تآكل المنشآت المعدنية	0.99		0.80		0.59	
تلطيخ الملابس، السيارات، المباني، ألخ...	0.12		0.09		0.07	
تكاليف تلوث الهواء الأخرى		**1.45**		**1.16**		**0.88**
انخفاض الرؤية	0.30		0.23		0.18	
كلفة مخمدات تلوث الهواء	1.15		0.93		0.70	
تأثير إزالة المناجم		**0.73**		–		–
تأثير التغيرات المناخية		**2.04**		**1.66**		**1.22**
موجات الحرارة – التأثيرات على البشر	0.27		0.22		0.16	
الجفاف والخسائر الزراعية	0.16		0.13		0.10	
الخسائر في الماشية	0.13		0.10		0.07	
خسائر الغابات	0.16		0.13		0.10	
خسائر في الحيوانات والنباتات الأقليمية الموسمية	0.93		0.75		0.56	
مشاكل المخزون المائي وإنتاج الطاقة	0.25		0.21		0.15	

نوع الضرر	الضرر البيئي ($ لكل جيجاجول)*					
	الفحم		النفط		الغاز الطبيعي	
	الضرر النوع	المجموع الكلي	الضرر النوع	المجموع الكلي	الضرر النوع	المجموع الكلي
الفيضانات	0.07		0.06		0.04	
العواصف، الأعاصير والبراكين	0.07		0.06		0.04	
تأثير ارتفاع مستوى سطح البحر		**0.47**		**0.38**		**0.28**
المجموع		**14.51**		**12.52**		**8.26**

* يعتبر عام 1998 السنة المرجعية

في أوروبا تم تحديد تكلفة الضرر البيئي بطريقة أخرى، وهي تحديد تكلفة الضرر البيئي الناتج من كل كيلوجرام غاز على حدة، وبغض النظر عن الوقود المستخدم. والتي من وجهة نظرنا أكثر مرونة من الطريقة الأولى، وذلك لأنه في بعض الحالات وبسبب القيود المفروضة على بعض الغازات دون غيرها كتلك المفروضة على غاز CO_2 والغازات الدفيئة. لهذا السبب قد تستخدم بعض الأجهزة الخاصة لمعالجة بعض الغازات قبل طردها في الهواء الجوي. ففي المعالجة الاقتصادية لتقييم الضرر البيئي يجب تنحية الضرر الناجم من الغازات المعالجة وحساب الضرر الناتج من الغازات الأخرى، وهذا غير ممكن في الطريقة الأولى لأن الضرر محسوب لكل الغازات الناتجة من حرق الوقود الأحفوري (Varela, et al., 2001).

وبذلك يجب التنبيه، بأنه ليس من السهولة الحصول على رقم محدد لتلك الأضرار، لأن الضرر البيئي للملوثات يعتمد بصورة كبيرة على عدة عوامل، أهمها: حالة المحطة العامة، ارتفاع المدخنة، درجة حرارة وسرعة الغازات العادمة، بالإضافة إلى بعض الاعتبارات الطبوغرافية والجيوغرافية الأخرى. الجدول (3.8) يبن كلفة الضرر البيئي الناجم عن طرد 1 كيلوجرام من الغازات العادمة مباشرة في الهواء وبدون معالجة إطلاقاً بوحدات [€/kg] ، تحت الشروط الأوربية لمحطة طاقة نموذجية وبأسعار عام 2003 (Zwaan, Rabl, 2003).

جدول (3.8) كلفة الضرر البيئي لكل كيلوجرام من الغازات العادمة الملوثة

الملوث	الضرر	التكلفة [€/kg]*
PM (ابتدائي)	المرض والوفاة	15.40
SO_2 (ابتدائي)	المحاصيل، المواد	0.30
SO_2 (ابتدائي)	المرض والوفاة	0.30
SO_2 (بواسطة الكبريتات)	المرض والوفاة	9.95
NO_2 (ابتدائي)	المرض والوفاة	مهمل
NO_2 (بواسطة النيترات)	المرض والوفاة	14.50
NO_2 (بواسطة الأزون)	المحاصيل	0.35
NO_2 (بواسطة الأزون)	المرض والوفاة	1.15
VOC (بواسطة الأزون)	المحاصيل	0.20
VOC (بواسطة الأزون)	المرض والوفاة	0.70
CO (ابتدائي)	المرض	0.002
CO_2	الاحترار العالمي	0.029

* يعتبر عام 2003 السنة المرجعية

ولجعل هذا التقييم عملياً، فإن تقييم الضرر الناتج من حرق الوقود سيكون أكثر وضوحاً، ولهذا أضاف (Nassar, et al., 2004) خطوات أخرى ضرورية لاستكمال عملية التقييم وهي:

- تحديد كمية الوقود المحروقة سنوياً لإنتاج أية صورة من صور الطاقة.
- حساب كمية الغازات المنبعثة نتيجة لحرق الوقود، والأخذ بالاعتبار أي أجهزة معالجة ومدى كفاءة أجهزة تحويل الطاقة. الجدول (4.8) يبين كتلة الملوثات المنبعثة من حرق متر مكعب من بعض أنواع الوقود الأحفوري، والمستخدم في معظم محطات توليد الطاقة الكهربائية (Heinsohn, Kabel, 1999)، (Haraden, 1989).

جدول (4.8) كمية الغازات المنبعثة kg من أفران حرق الوقود الأحفوري m_3، بدون معالجة

الوقود		PM	SO_2	NO_2	VOC	CO	CO_2 [a]
الفحم [kg/m^3]							
النفط [kg/m^3]	الثقيل	$1.25S^b+0.38$	19.3S	6.6	0.6	0.034	862
	الخفيف	0.24	17.3	2.4	0.6	0.024	745
الغاز الطبيعي [$kg/10^6m^3$]		80 – 16	9.6	2240	560	44	430E03

[a] الانبعاثات الصادرة من المرجل

[b] S – هو نسبة الكبريت في الوقود (أي عندما يحتوي الوقود على 2.1% كبريت فإن $S = 2.1$). يحتوي الوقود الليبي على الكبريت بنسبة 0.420% (Abdulaziz, AbdulKader, 2003).

- إيجاد كلفة الضرر البيئي، وذلك عن طريق اختيار نوع الضرر الناجم من حرق الوقود الأحفوري من الجدول (1)، وفي حالة وجود معدات معالجة خاصة لبعض الغازات العادمة يعالج الضرر من الجدولين (2، 3).
- إضافة كلفة الضرر البيئي مع كلفة إنتاج وحدة الطاقة، وبالتالي لحصل على الكلفة الحقيقية لإنتاج وحدة الطاقة.

لتوضيح هذا الإجراء، يجب أخذ حالة خاصة لدراسة الملوثات وأثرها الاقتصادي على البيئة. ستكون منظومة توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا هدفاً للدراسة التحليلية البيئية الاقتصادية.

5.8 نظام توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا

يعتمد التوليد الكهربائي في ليبيا على 17 محطة طاقة بتوربينات بخارية وغازية، وتتمركز معظمها على الشريط الساحلي الشمالي للبلاد. بلغت الطاقة الكهربائية الإجمالية المنتجة في نهاية عام 2002 حوالي 17,530,671 MWh، تشارك المحطات

البخارية بنسبة 53.48% من الإنتاج، وكان نصيب المحطات الغازية حوالي 46.38%، أما الباقي فكان من نصيب محطات الديزل والتي مازالت تعمل في بعض المناطق الجنوبية من البلاد. والجدول (5.8) يبين الطاقة الكهربائية المنتجة السنوية تبعاً لنوعية التوليد. أما عن الوقود المستخدم في التوليد فهو من النفط الثقيل، النفط الخفيف والغاز الطبيعي، والذي ينتج في ليبيا. والجدول (6.8) يبين كمية الطاقة الكهربائية المنتجة تبعاً لنوعية الوقود، وكمية الاستهلاك منه. رغم أن الشركة العامة للكهرباء الليبية تقدم الطاقة الكهربائية للاستهلاك المنزلي بسعر مدعوم بمبلغ 20 ديناراً ليبياً لكل ميغاوات ساعة، إلا أن الكلفة الفعلية لإنتاج الطاقة الكهربائية تقدر بمبلغ 108 ديناراً ليبياً لكل ميغاوات ساعة كهرباء، أو ما يعادل 67.5 يورو لكل ميغاوات ساعة (حسب سعر الصرف لعام 2004) (الشركة العامة للكهرباء، 2002).

جدول (5.8) الطاقة الكهربائية المنتجة في ليبيا تبعاً لنوع التوليد لعام 2002، (MWh)

	نوعية التوليد			المجموع
	بخاري	غازي	ديزل	
كمية الكهرباء المنتجة، (MWh)	9,376,252	8,130,305	24,115	17,530,671
نسبة الإنتاج، %	53.48	46.38	0.14	100

جدول (6.8) الطاقة الكهربائية المنتجة تبعاً لنوع الوقود (MWh)، وكمية استهلاك الوقود (m_3)

	نوعية التوليد			المجموع
	غاز طبيعي	نفط خفيف	نفط ثقيل	
كمية الكهرباء المنتجة، (MWh)	3,366,833	7,215,022	6,948,816	17,530,671
نسبة الإنتاج، %	19.21	41.16	39.64	100
كمية استهلاك الوقود، (m^3)	1,025,760,483	2,662,082	2,145,057	

تبعاً للخطوات التي تم الإشارة إليها في الجزء السابق، فان كمية الغازات العادمة المنبعثة من مداخن محطات توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا وكلفة الضرر البيئي الناجم عنها، مدرجة في الجدول (7.8)، (Nassar, et al., 2004).

جدول (7.8) كمية الغازات المنبعثة (kg/MWh) وتكلفة الضرر البيئي (€/MWh) من محطات توليد الطاقة الكهربائية

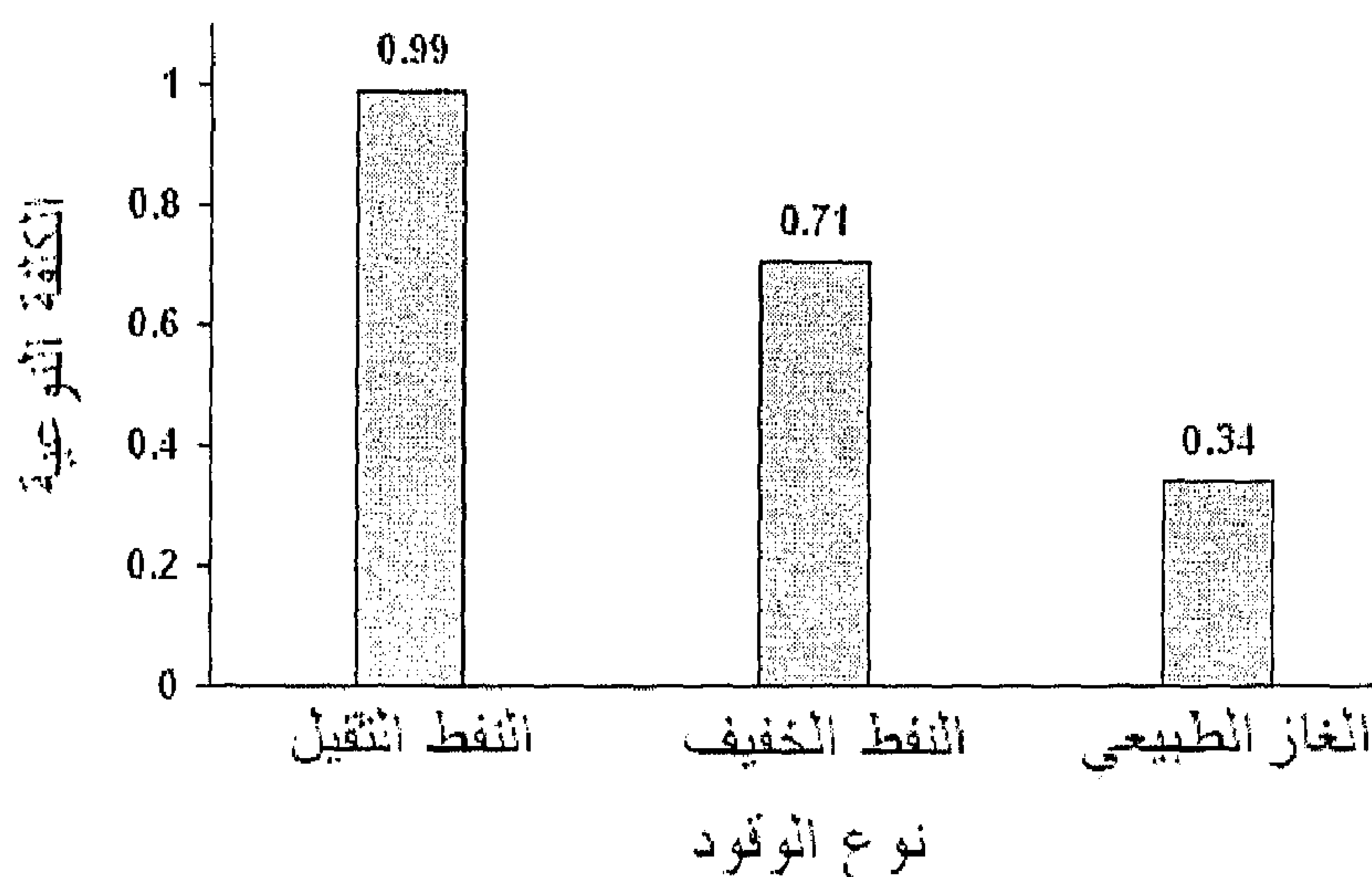
الملوثات	CO_2	PM	SO_2	NO_2	CO	VOC
كمية الانبعاث، (kg/MWh)	223	0.13077	1.72870	1.20178	0.19240	0.01092
تكلفة الضرر البيئي، (€/MWh)	6.467	2.01377	18.2377	19.2285	0.00038	0.00983

وبالتالي فان كلفة الضرر البيئي جراء إنتاج 1 ميغاوات ساعة طاقة كهربائية بناءاً على المعلومات السالفة الذكر بخصوص مساهمة أنواع الوقود في توليد الطاقة الكهربائية، تقدر بمجموع الصف الأخير في الجدول (7.8) وهو 45.957 €/MWh أي ما يعادل 73.531 ديناراً ليبياً لكل ميغاوات ساعة طاقة كهربائية (سعر صرف العملة لعام 2004). وهذا يعني أن التكلفة الحقيقية لإنتاج الطاقة الكهربائية هو مجموع سعر إنتاج الطاقة الكهربائية مع تكلفة الضرر البيئي من إنتاج الطاقة الكهربائية (108+73.531 = 181.53 ديناراً ليبياً لكل ميغاوات ساعة طاقة كهربائية).

6.8 الكلفة النوعية لإنتاج الطاقة الكهربائية

في هذا الموضع، يمكن تقديم مصطلح اقتصادي - بيئي جديد للطاقة وهو الكلفة النوعية لإنتاج الطاقة الكهربائية، الذي استحدث من قبل (Nassar, et al, 2004)، وهو يمثل النسبة بين تكلفة الضرر البيئي لإنتاج الطاقة إلى الكلفة الحالية لإنتاج الطاقة (أي، بدون إقحام الضرر البيئي). وبالتالي فان الكلفة النوعية لإنتاج الطاقة

الكهربائية تبعاً لنوعية الوقود الأحفوري المستخدم يمكن تمثيله بيانياً كما هو مبين في الشكل (4.8). ويتضح من الشكل (4.8) أن استخدام الوقود الثقيل سيزيد من الكلفة الحقيقية لإنتاج الطاقة الكهربائية، نفس النتيجة يمكن التوصل إليها بإلقاء نظرة على الجدول (2.8)، والواضح أن كمية الغازات الأكثر ضرراً للبيئة تصدر من الوقود الثقيل في المرتبة الأولى ثم الوقود الخفيف فالغاز الطبيعي. ولهذا السبب توجهت معظم الدول إلى استخدام الغاز الطبيعي كوقود لإنتاج الطاقة الكهربائية.



شكل (4.8) نسب مساهمة نوع الوقود في الكلفة النوعية لإنتاج الطاقة الكهربائية

7.8 انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون من تقنيات توليد الطاقة الكهربائية المتجددة والتقليدية

إن انبعاث الغازات الضارة في المحطات التقليدية المعتمدة على التوليد الحراري من حرق الوقود الأحفوري تتم في كافة المراحل، تشييد المحطة، إمداد الوقود والتشغيل. أما في محطات الطاقات المتجددة فان انبعاث الغازات العادمة، معدومة

في مرحلتي الإمداد بالوقود والتشغيل في معظم المحطات، إلا أن الانبعاث يحـدث في مرحلة تشييد المحطة، والذي يتمثل في مرحلة تصـنيع المعـدات ونقلـها وتركيبهـا في الموقع، والتي يجب أن تُؤخذ بعين الاعتبار أيضاً عند التقييم الاقتصـادي - البيئـي. يوضح الجدول (8.8) مقارنة مقدار انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون (kg) الصادر من توليد (kWh) من محطات توليد الطاقـة الكهربائيـة المختلفـة (الناصـر، 2002)، (Haraden, 1989).

جدول (8.8) مقارنة مقدار انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون (kg) الصادر من توليد (kWh) من التقنيات المختلفة لمحطات توليد الطاقة الكهربائية

م	التقنية	كمية غاز ثاني أكسيد الكربون المنبعثة ($kg\ CO_2/kWh$)			
		التشييد	إمداد الوقود	التشغيل	الاجمالي
1	المائية ($20\ MW$)	0.004	0.0	0.0	0.004
2	الرياح (متوسط 37 توربين ($10kW/3MW$))	0.020	0.0	0.0	0.020
3	النووية ($1300MW$)	0.009	0.016	0.0	0.025
4	حرارة جوف الأرض – ثنائي			0.0	
5	حرارة جوف الأرض – وميضي			0.06	
6	حرارة جوف الأرض – أمريكا			0.033	
7	حرارة جوف الأرض – المكسيك			0.175	
8	حرارة جوف الأرض – إيطاليا			0.38	
9	الخلايا الشمسية ($300kW$) - استوائي	0.1	0.0	0.0	0.1
10	الخلايا الشمسية ($300kW$) - أوروبي	0.2	0.0	0.0	0.2
11	الغاز الطبيعي – دورة مشتركة ($300MW$)	0.01	0.02	0.35	0.38
12	الغاز الطبيعي – دورة مشتركة ($400MW$)	0.01	0.02	0.44	0.47
13	الغاز الطبيعي – توربين غازي ($150MW$)	0.01	0.03	0.54	0.58
14	النفط ($400MW$)	0.01	0.06	0.69	0.76

م	التقنية	كمية غاز ثاني أكسيد الكربون المنبعثة $(kg\ CO_2/kWh)$			
		التشييد	إمداد الوقود	التشغيل	الاجمالي
15	الفحم $(\text{Bituminous} - 200MW, \text{PFBC})$			0.79	
16	الفحم $(\text{Bituminous} - 300MW, \text{PFBC})$	0.01	0.05	0.73	0.79
17	الفحم - دورة بخارية $(\text{Bituminous} - 700MW)$	0.01	0.05	0.76	0.82
18	الفحم $(\text{Lignite} - 300MW, \text{Gasifier})$	0.01	0.04	0.86	0.91
19	الفحم- دورة بخارية $(\text{Lignite} - 800MW)$	0.01	0.04	1.00	1.04
20	خشب - دورة بخارية			0.19	
21	غاز الكتلة الحيوية - دورة بخارية			0.18	

المراجع

1. الشركة العامة للكهرباء، *التقرير السنوي*، طرابلس - ليبيا، (2002).
2. عيسى وهيب الناصر، *مستقبل الطاقات المتجددة*، الجمعية العالمية للطاقة الشمسية - القسم العربي، (2002).
3. Abdulaziz, M.A. and AbdulKader, A., *Petroleum Research Journal*, **15**, 73 (2003). "Evaluation study for a number of Libyan crude oils and its products by using chemical composition (^{13}Cn.m.r. spectroscopy technique) and some physical properties."
4. Duffie, J. A., Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Suns inc., 2nd edition, (1991).
5. Haraden, J., *Int. J. Energy*, **12**, 867 (1989). "CO_2 production rates for geothermal energy and fossil fuels."
6. Heinsohn, R. J. and Kabel, R. L., *Sources and Control of Air Pollution*, Prentice Hall, (1999).
7. Hsieh, S. J., *Solar Energy Engineering*, Prentic-Hall, (1981).
8. Kreith, F., Kreider, J.F., *Principles of Solar Engineering*, Hemisphere Publishing Corporation, USA, (1978).
9. Nassar, Y.F., Yousif, S.A., Salem, A.A., *Proceedings of the Fifth Conference for High Voltage Electric Systems,* June 21-23 (2004), Algiers-Algeria. "Economic Analysis for the Power Production Unit of the Conventional Fired Fossil-Fuel Power Plants Involving the Environmental Impacts."
10. Richter, L. A., Volkov, E. P. and Prokrovsky, V. N., T*hermal Power Plants and Environmental Control*, translated from the Russian by V. Afanasyev, Mir Publishers, Moscow, (1981).

11. Saifur, R., Arnulfo de Castro, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **2**, 307 (1995). "Environmental Impacts of Electricity Generation: A Global Perspective"

12. Varela, M., Saez, R., Audus, H., Solar Energy, 2, 95 (2001). "Large-Scale Economic Integration of Electricity from Short-Rotation Woody Crops."

13. Veziroglu, T.N., *Proceeding of the Work Shop on New Trends and Breakthroughs in Hydrogen Energy*, April 02-05 (2001), Istanbul-Turkey, 1. "Hydrogen Energy System as a Permanent Solution to Global Energy-Environmental Problems."

14. Zwaan, B. and Rabl A., *Solar Energy*, **74**, 19 (2003). "Prospects for PV: a learning curve analysis."

الفصل التاسع
توليد الطاقة الكهربائية

1.9 مقدمة

لعل من أهم دلائل تقدم الشعوب هو مقدار استهلاكها للطاقة الكهربائية. إن الطاقة الكهربائية سهلة التوصيل والتحويل لأية صورة من الطاقات الأخرى، ومتوفرة بمجرد الضغط على المفتاح، ومازالت تعتبر المصدر الرئيسي للطاقة للاستخدامات المنزلية والتجارية وفي معظم التطبيقات الصناعية. تمثل الطاقة الكهربائية ما نسبته 40% من المجموع العالمي للطاقة المستهلكة، وتعتبر مقياس جيد لتقدم الاقتصاد القومي.

وتواجه الكثير من الدول النامية عدة تحديات في سبيل الحصول على مصدر إمداد طاقوي آمن لتلبية احتياجات الطاقة لديها في ظل التزايد السريع للنمو الاقتصادي في تلك الدول، بالإضافة إلى العديد من المشاكل المتزامنة مع الزيادة في التوليد الكهربائي، وأخص بالذكر منها الدعم المادي ومشاكل البيئة. أما في الدول المتقدمة فالضغوط تتزايد لإيجاد بدائل للطاقات التقليدية وزيادة كفاءة الإنتاج والاستهلاك في قطاع الطاقة الكهربائية، في محاولة للحد من انبعاث الغازات العادمة من مداخن محطات الطاقة والتي تتسبب في دمار البيئة ليس فقط محلياً وإنما ينتشر الضرر أيضاً عالمياً كما هو الحال في ظاهرة الاحتباس الحراري الكوني الذي تعاني منها الكرة الأرضية. وللحد من هذا التلوث، سنت الكثير من الدول قيوداً صارمة على انتشار غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 المتهم الأول في ظاهرة الاحتباس الحراري للرجوع إلى نسب تركيزه في الهواء الجوي إلى عام 1990.

العديد من دول العالم بما في ذلك الدول النامية أقدمت على توقيع معاهدات مثل برتوكول Kyoto للتقليل من انبعاث غاز CO_2، وبهذا أصبحت المشكلة عالمية غير مقتصرة على دولة متقدمة وأخرى نامية. ولهذا السبب وإحساساً من جانبها بالمسئولية، أقدمت العديد من الدول المتقدمة على منح بعض الدول النامية مساعدات مالية لإنشاء محطات قوى تعمل بالطاقة الشمسية.

إن مجال صناعة الطاقة يجلب الاهتمام البالغ والدعم الكبير، وننتظر كل يوم تغيرات دراماتيكية في اتجاه تحول إنتاج الطاقة في اتجاه الطاقات الجديدة والمتجددة وإلى الطاقة الشمسية على وجه الخصوص.

يستعرض هذا الفصل الطرق المختلفة لاستخدام الطاقة الشمسية في توليد الطاقة الكهربائية. توجد هناك طريقتان أساسيتان لتوليد الطاقة الكهربائية؛ أولاهما: استخدام الخلايا الفوتوضوئية، والتي يطلق عليها الطريقة المباشرة لتحويل الطاقة الشمسية. استخدمت الخلايا الشمسية بنجاح لعدة سنوات في برامج الفضاء، حيث الكفاءة والكلفة لا تمثل الدوافع الأساسية وراء استخدام الطاقة الشمسية. في الوقت الحالي الطاقة الكهربائية المنتجة من الخلايا الشمسية ليست بالحل العملي والاقتصادي للطلب الكبير على الطاقة، ويرجع السبب في ذلك إلى قلة كفاءة هذه الخلايا نسبياً، بالإضافة إلى الكلفة العالية لتقنيات الخلايا الشمسية.

على المدى القريب، تعتبر الطاقة الشمسية الحرارية الأمل الأكبر اقتصادياً، حيث تنتشر حول العالم محطات طاقة حرارية شمسية، تولد الطاقة الكهربائية بأسعار منافسة لتلك المولدة من المحطات التقليدية، وأقل بكثير من كلفة الطاقة الكهربائية المتولدة من الخلايا الشمسية، بالإضافة إلى أنها الخيار الأمثل لإنتاج الطاقة الكهربائية على المستوى الضخم والذي يصل إلى عدة مئات من الميغاواات.

2.9 التوليد الكهربائي الحراري الشمسي

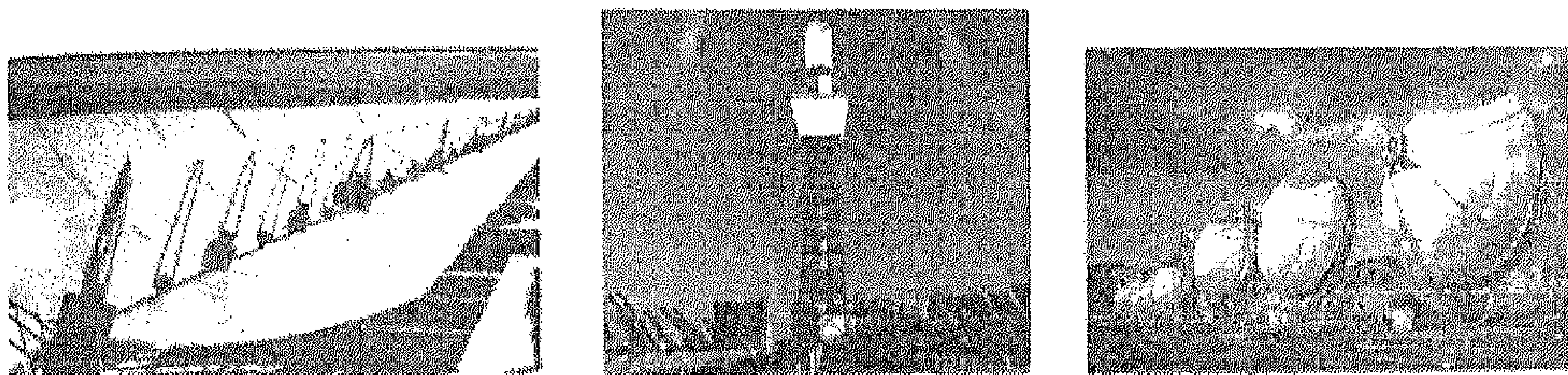
إن ما نسبته 1% من صحاري العالم كافية لتزويد العالم كله بالطاقة الكهربائية من محطات الطاقة الشمسية للتوليد الحراري للطاقة الكهربائية. الأمل معقود على إنشاء مثل هذه المحطات في الدول التي تقع في نطاق المنطقة المفضلة للتطبيقات الحرارية الشمسية والتي حددها العلماء، كما هو مبين في الشكل (1.9)، (Nassar, Salem, 2002). الطريق ممهد بعد ذلك لتوزيع الطاقة الكهربائية المنتجة إلى كافة العالم عبر شبكة الكهرباء الدولية التي تربط العديد من دول العالم بعضها ببعض لتحل محل شبكات أنابيب النفط والغاز.



شكل (1.9) المناطق المفضلة في العالم للتطبيقات الشمسية الحرارية

هناك العديد من أنواع محطات الطاقة الحرارية، والتي في معظمها من نوع المركزات مثل، نوع الطبق (Stirling)، نوع القطع المكافئ القيعاني (Trough)، والمرايا (heliostat)، كما هو موضح في الشكل (2.9). وسوف يتناول هذا الفصل

دراسة النوع الأخير بالتفصيل وهو ما يعرف بالمستقبلات المركزية الشمسية (Solar central receiver). بالإضافة إلى المدخنة الشمسية (Solar chimney)، والتي أثبتت نجاحها اقتصادياً في أسبانيا.

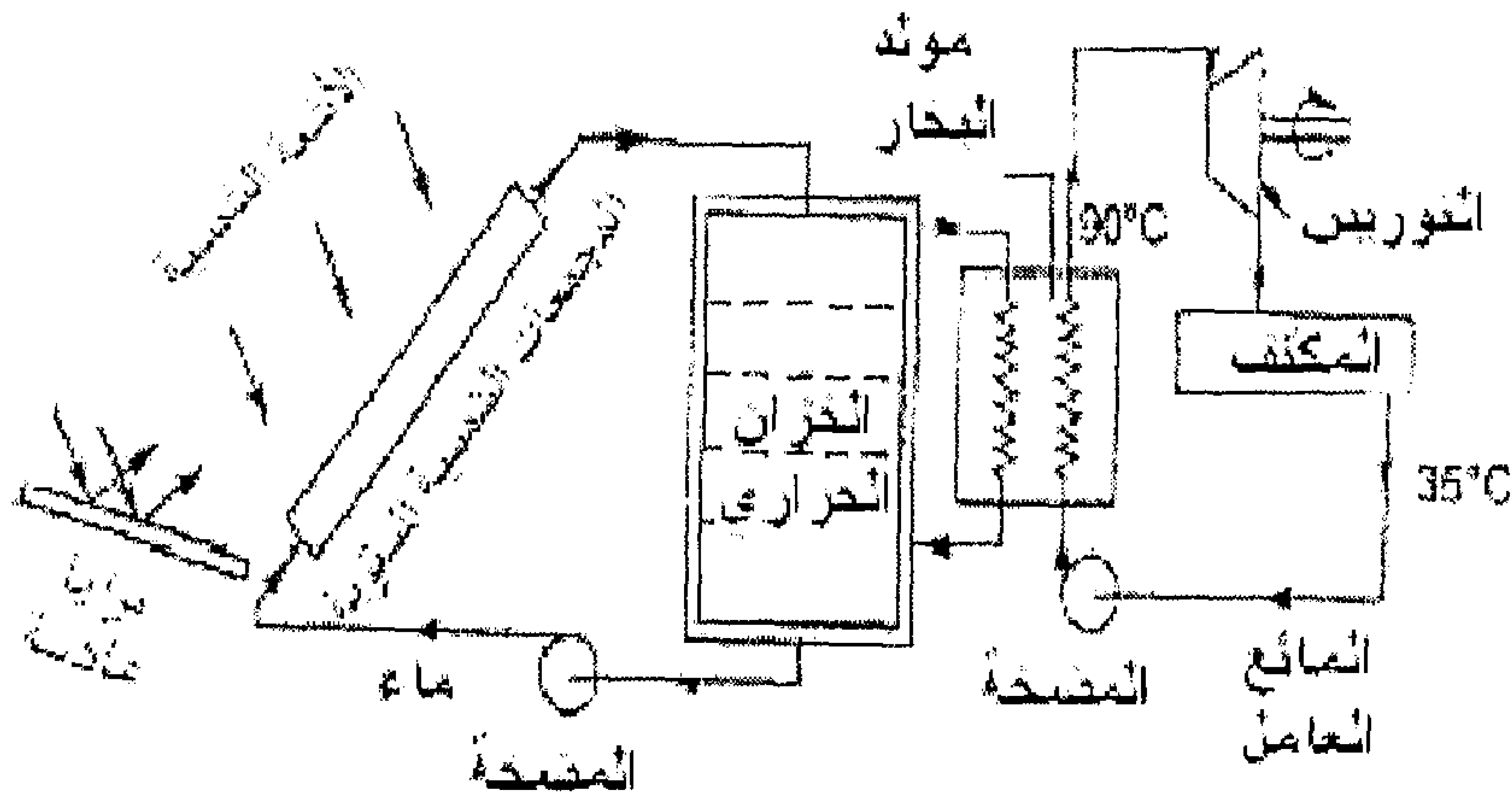


شكل (2.9) صور لأنواع المركزات: الطبق (Stirling)، المرايا (heliostat)، والقطع المكافئ القيعاني (Trough)، على التوالي.

تصنف دورات القدرة الحرارية بناءاً على درجة حرارة المائع العامل إلى دورات ذات درجة حرارة منخفضة، متوسطة ومرتفعة.

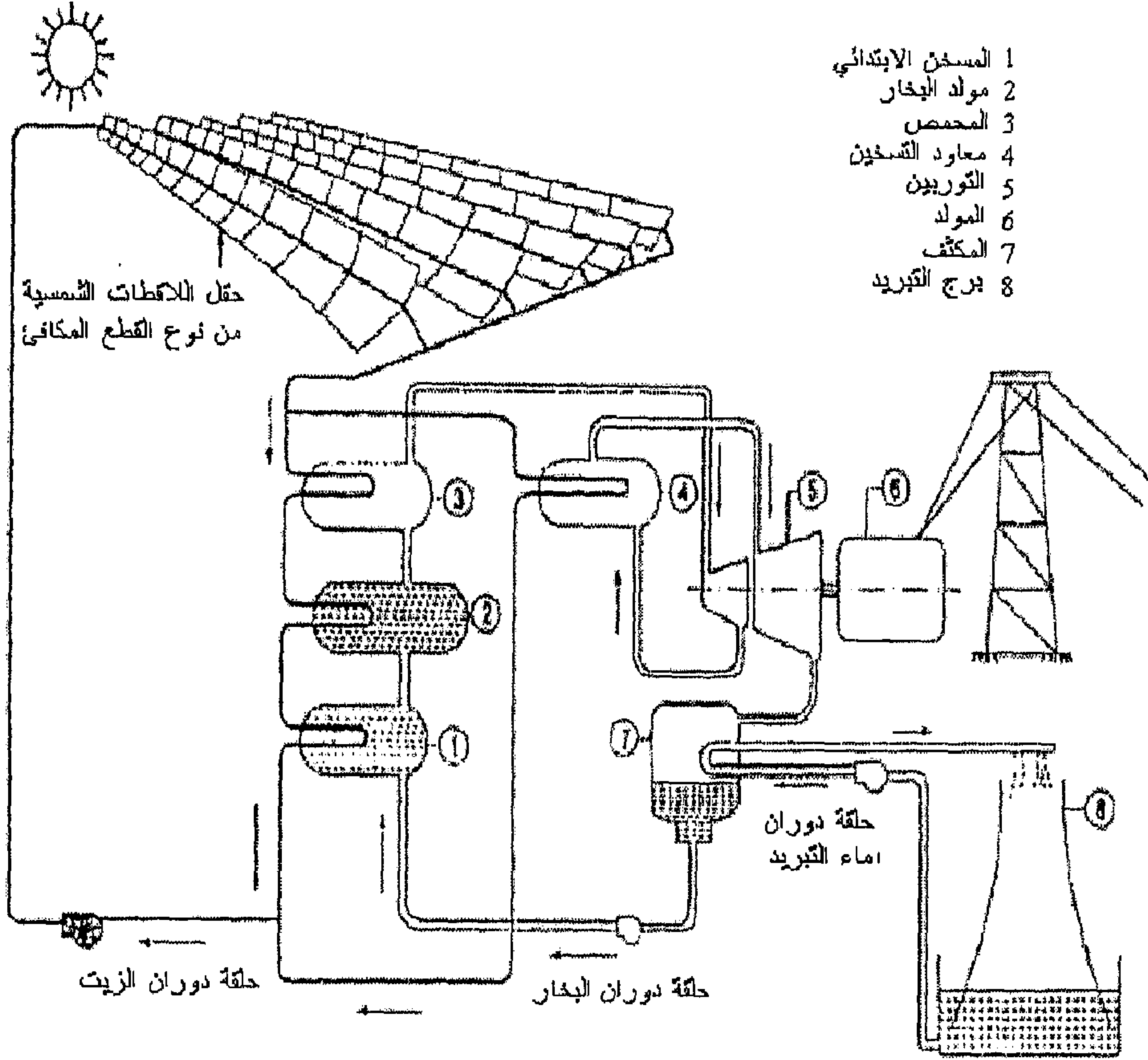
تعمل دورات درجات الحرارة المنخفضة عند حوالي 100°C. إن منظومة نموذجية من هذا النوع تُستخدم مجمعات شمسية مستوية وتعمل على أساس دورة رانكين (Rankine cycle) المبينة في الشكل (3.9)، وعادة ما يكون المائع العامل من السوائل العضوية مثل ميثول الكلوريد وتولين ومن موائع التبريد مثل R114, R113, R11. ولقد أنشئت منظومات من هذا القبيل فرنسية التصميم بقدرات 50 kW مبكراً في السبعينات في العالم وخاصة في أفريقيا. في وسط محطات الطاقة الحرارية الشمسية لتوليد الطاقة الكهربائية، تلك العاملة عند درجات حرارة متوسطة وتستخدم تقنية البؤرات الخطية لمركزات القطع المكافئ القيعانية، وعند درجة حرارة تصل إلى 400°C أثبتت بأنها أكثر اقتصادية وأنجح تشغيلاً (Sukhatme, 1997). إن مخطط لمنظومة نموذجية ذات درجات حرارة متوسطة مبين

في الشكل (4.9). أنشئت أول محطة طاقة من هذا النوع في صحراء موجاف في ولاية كاليفورنيا بالولايات المتحدة الأمريكية في عام 1984. وأصبح عددها تسع محطات حتى عام 1991 بقدرة إنتاجية كلية $354\,MW_e$، والتي تغذي الشبكة العامة للكهرباء بما يعادل 8×10^8 kWh في السنة، مشيدة على مساحة $7\,km^2$ (أنظر شكل (5.9)), إن ثمانية من هذه المحطات يمكن تشغيلها بالوقود الاحفوري التقليدي لإنتاج الطاقة الكهربائية في كل الظروف الجوية السيئة وأثناء الليل (Cohen, 1999). وانخفضت كلفة الطاقة الكهربائية المنتجة في المحطة الأولى من 0.27 \$US/kWh إلى 0.12 - 0.14 \$US/kWh في المحطة الأخيرة. تستخدم محطات الطاقة من هذا النوع مركزات الطاقة الشمسية لتسخين زيت صناعي يدور في الأنبوب الماص للمجمعات الشمسية. في المبادل الحراري يتم نقل حرارة الزيت الصناعي إلى ماء التغذية في دورة رانكين.



شكل (3.9) دورة رانكين لتوليد الطاقة الكهربائية تعمل عند درجات حرارة منخفضة

أما عن المنظومات ذات درجات الحرارة المرتفعة فإنها تستخدم الأطباق أو المستقبلات المركزية التي توضع على قمة برج تكون بؤرة حقل من المرايا التي تعكس

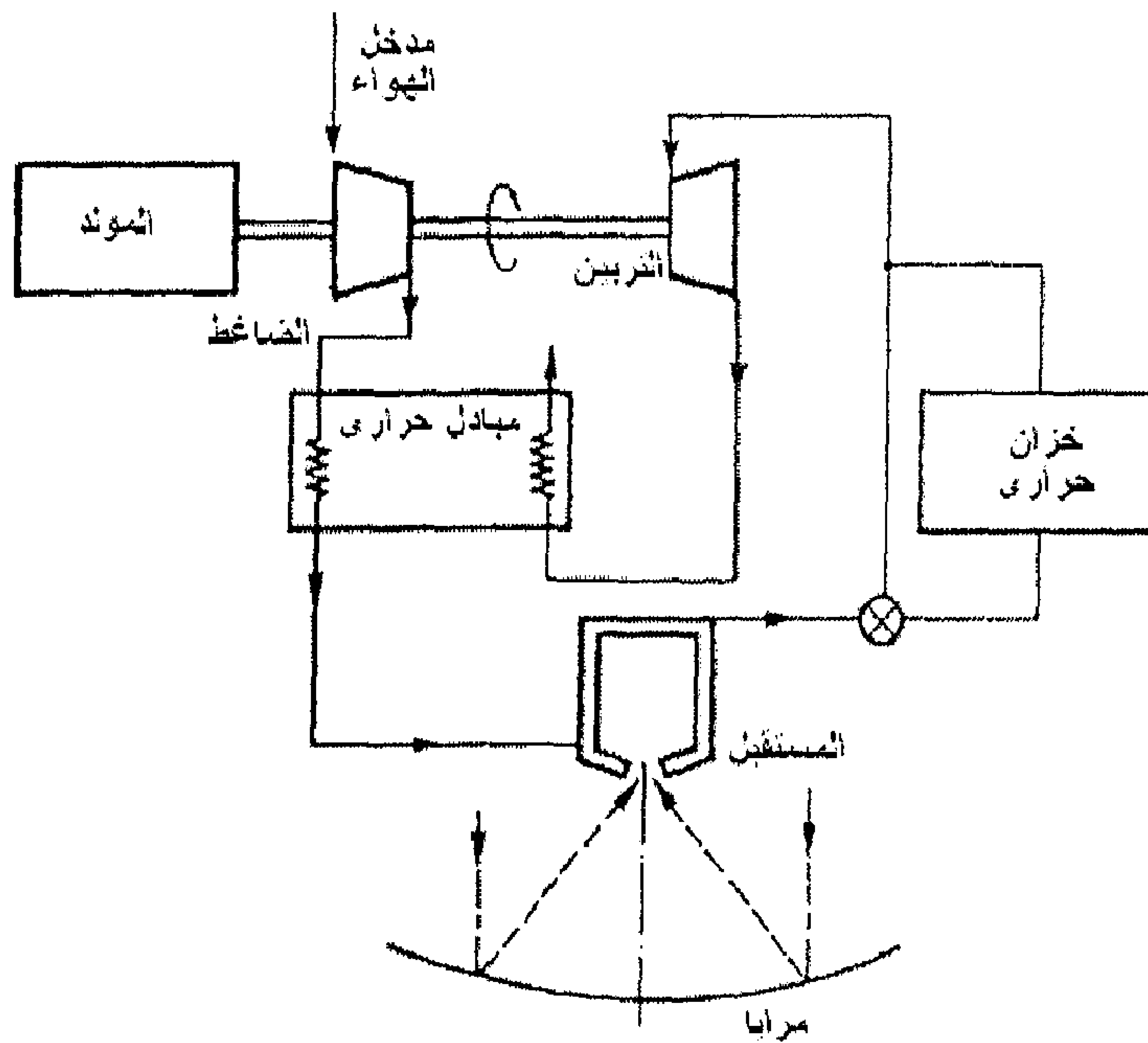


شكل (4.9) مخطط لمنظومة نموذجية ذات درجات حرارة متوسطة من نوع القطع المكافئ

الأشعة الشمسية إلى المستقبل المركزي. في المجمعات الطبقية، يتتبع المجمع الشمس بواسطة الدوران على محورين والأشعة الشمسية تنعكس وتتجمع في البؤرة. يتدفق المائع خلال البؤرة ويسخن، وتستخدم هذه الحرارة لتشغيل محرك مبدئي. والمحركات العاملة بهذه الطريقة لها كفاءة تصل إلى حتى 30% وتولد طاقة تتراوح من 8 إلى 50 kWh. يمكن للمستقبلات الشمسية أن تمدنا بالطاقة النظيفة بدون أي انبعاثات، وهي الوحيدة القادرة على خزن الطاقة الشمسية وبكفاءة عالية. ويبين الشكل (6.9) العناصر الأساسية لمحطة قدرة استقبال مركزي والتي يتحول فيها الماء إلى بخار في المستقبل (Fisk, Anderson, 1982)، (Sukhatme, 1997).



شكل (5.9) محطة طاقة من نوع القطع المكافئ في صحراء موجاف في ولاية كاليفورنيا بالولايات المتحدة بقدرة إنتاجية كلية $354\ MW_e$



شكل (6.9) مخطط لمحطة قدرة استقبال مركزي

في عام 1968، أقترح البروفسور J. Schlaich محطة قدرة تعمل على مبدأ المدخنة الشمسية. في مثل هذه المحطات، تحاط قاعدة مدخنة مركزية طويلة بواسطة بيت زجاجي دائري يتكون من غطاء شفاف مثبت على بعد بضعة أمتار فوق سطح الأرض بواسطة هيكل معدني. تمر الأشعة الشمسية خلال الغطاء الشفاف مسببة دفع الهواء إلى الأعلى عبر المدخنة المركزية، مدوراً بذلك توربيناً هوائياً موضوع بقرب قاعدة المدخنة. الهواء الساخن المتصاعد في المدخنة يُعوض باستمرار بهواء جديد يسحب إلى داخل البيت الزجاجي بفعل التفريغ الحاصل فيه. وفي عام 1981 أنشأت أول محطة تجريبية بقدرة 50 kW في مدينة Manzanare بأسبانيا. بلغ ارتفاع المدخنة 194.6 m ونصف قطر دائرة المجمعات الشمسية 122 m وبلغت سرعة الهواء المتصاعد داخل المدخنة حوالي 15 m/s. أنتجت الطاقة الكهربائية لمدة ثمان سنوات، وخلال الفترة التجريبية برهنت هذه المحطة على نجاح التقنية الجديدة. وكانت كلفة التشغيل أقل ما يمكن (Bernarde, 2003). لمزيد من المعلومات حول التوليد الكهربائي من الطاقة الشمسية ومدى ملائمة التقنيات المختلفة للتطبيق راجع (Nassar, et al., 2004).

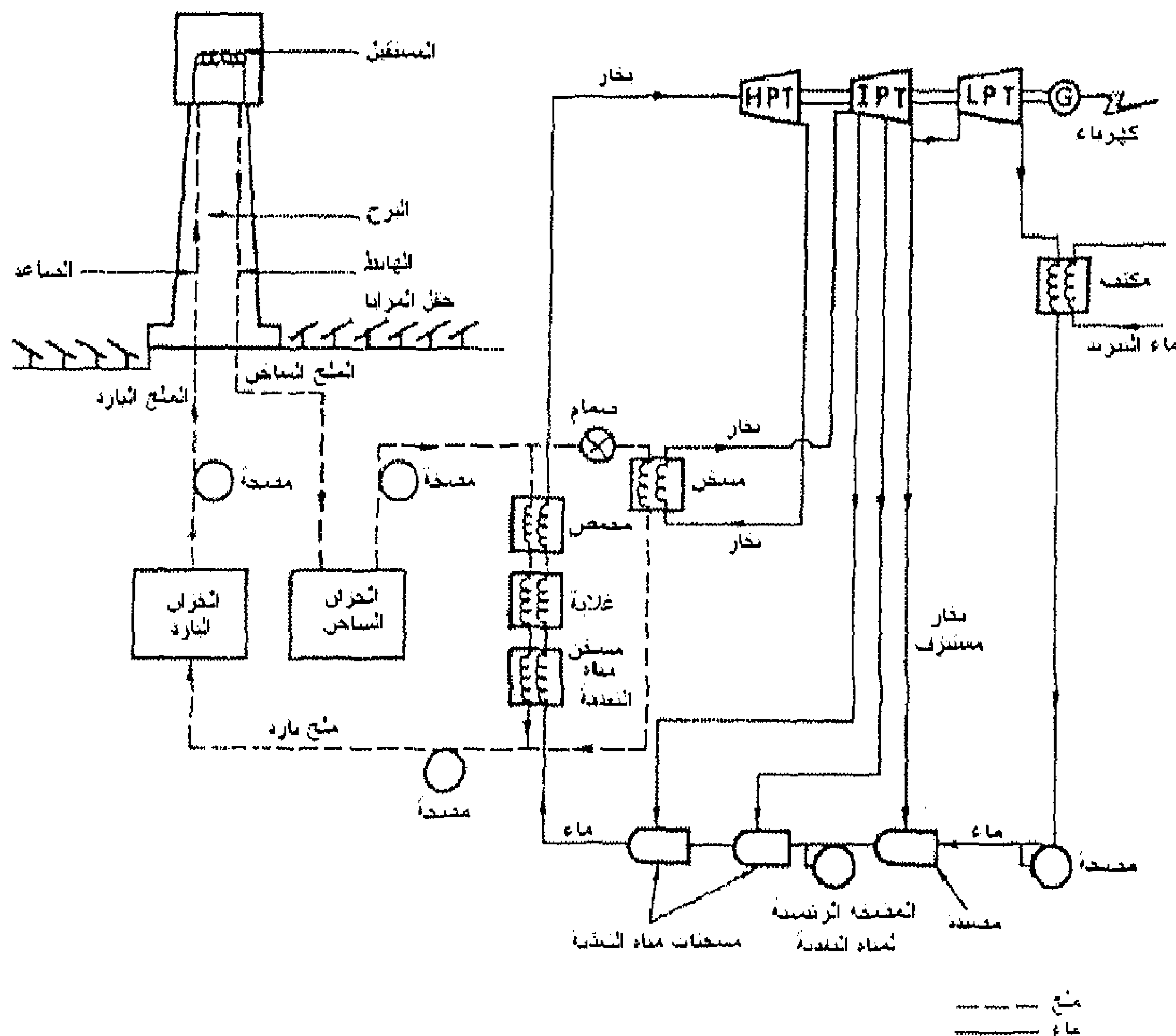
3.9 تقنية الأبراج الشمسية

1.3.9 مبدأ العمل

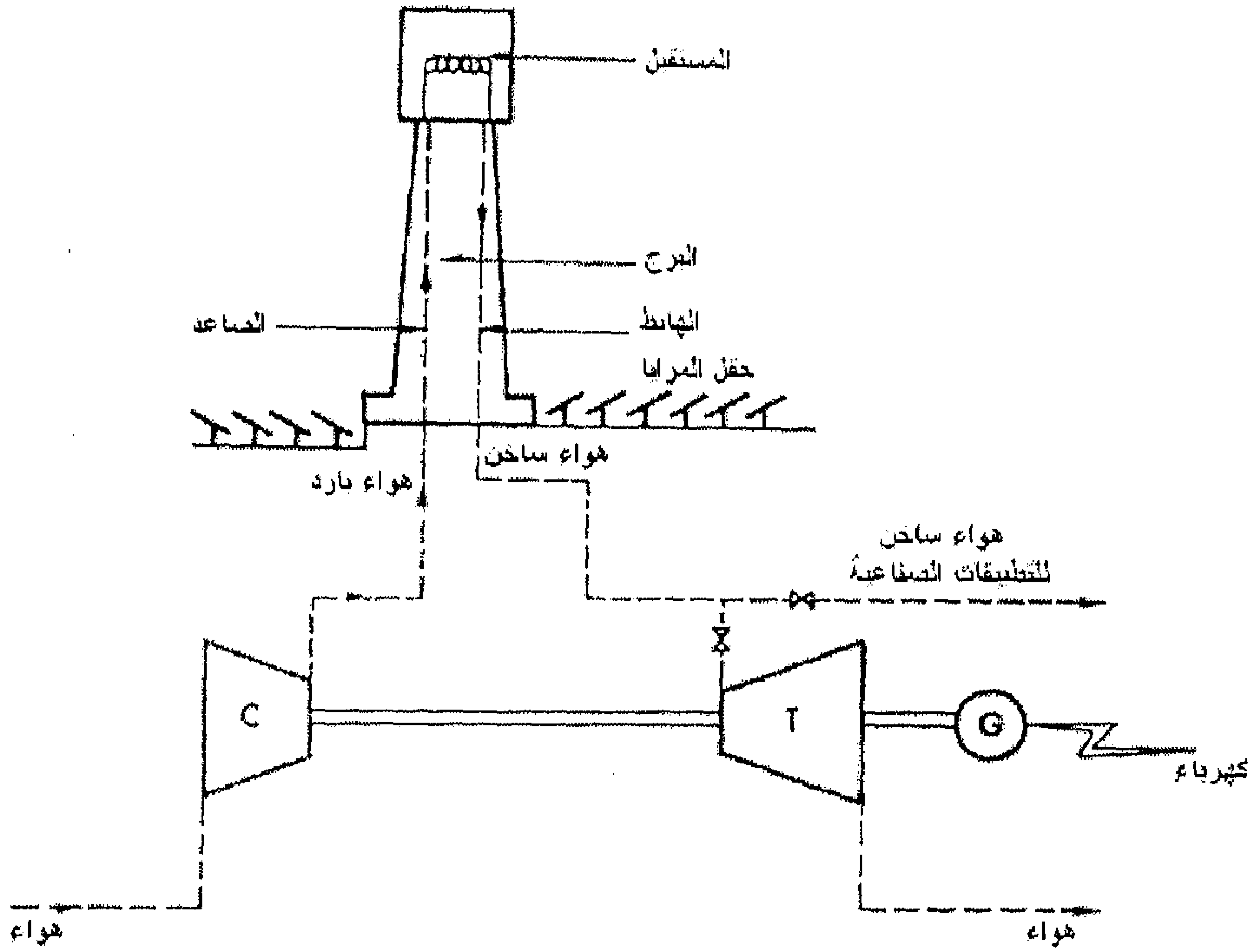
مبدأ عمل تقنية الأبراج الشمسية بسيط ويتمثل في؛ مستقبل مركزي (أو ماص للطاقة) مثبت في قمة برج يستقبل الطاقة الشمسية المركزة والمنعكسة من حقل مرايا (أو هيلوستات)، والتي ترتب بنمط منتظم بعض الشيء حول قاعدة البرج. ويمتاز هذا النظام بمقدرته على توليد درجات حرارة مرتفعة لتشغيل دورة قدرة ثيرموديناميكية وبكفاءة معقولة. لتوضيح مبدأ العمل أكثر، أعتبر المثال المبين في الشكل (7.9)، والمستخدم لمستقبل مركزي مع دورة رانكين لمنظومة تعمل على الملح المنصهر والذي يمثل المائع العامل في المنظومة. يُسخن الملح المنصهر في

المستقبل المركزي ويخزن بعدها في الخزان الساخن ويسحب بعد ذلك لكل من: المسخن، معاود التسخين، المحمص، الغلاية ومسخن ماء تغذية دورة رانكين. مثال أخر موضح في الشكل (8.9)، حيث يقوم المستقبل المركزي بتسخين الهواء في دورة برايتون (Brayton cycle) الهوائية المفتوحة لتوليد الطاقة.

توجد طريقتان شائعتا الاستعمال لتوزيع الهليوستات في حقل المرايا في منظومة الأبراج الشمسية؛ تُعرف الطريقة الأولى بالحقل الشمالي، ويكون فيها حقل المرايا على شكل شطيرة يقع البرج في المقدمة الجنوبية للحقل، كما هو مبين في الشكل (10.9). أما التشكيلة الثانية فتعرف بحقل الطوق (أو 360°)، وفيه يطوق حقل المرايا البرج من كافة الاتجاهات ويكون البرج في منتصف ـ إلى الجنوب بعض الشيء ـ للحقل، كما هو مبين في الشكل (10.9). لكل من هذين الطريقتين مزايا وعيوب، وبالمقارنة بينهما نصل إلى الملاحظات التالية:



شكل (7.9) مخطط لمحطة استقبال مركزية تعمل على الملح المنصهر



شكل (8.9) مخطط لمحطة استقبال مركزية تعمل على أساس الدورة الهوائية المفتوحة لتوليد الطاقة



شكل (10.9) رسم توضيحي لطرق توزيع الهليوستات في الحقل، شكل الطوق، شكل الشطيرة، على التوالي

أ) تعتمد كفاءة الحقل على ما يسمى بجيب تمام التشكيلة. فإذا كانت θ تمثل الزاوية المحصورة بين الأشعة الشمسية والعمودي على الهليوستات، فإن الطاقة

الحقيقية المستقبلة من قبل المستقبل على وحدة مساحة الهليوستات هي $H\cos\theta$، حيث H تمثل فيض الأشعة الشمسية. يكون تأثير جيب التمام أقل ما يمكن في التشكيلة الشمالية، مما يجعل كفاءة الحقل الشمالي أكبر من تلك لتشكيلة حقل الطوق.

ب) لأي كمية طاقة مطلوبة، توضع نسبة كبيرة من الهليوستات بعيداً عن البرج في الحقل الشمالي، مما يؤدي إلى ضعف أداء المنظومة.

جـ) تتطلب تشكيلة الحقل الشمالي برجاً أطول منه في تشكيلة $360°$، وهذا يعني زيادة في الكلفة.

2.3.9 تخطيط حقل الهليوستات

ترتب الهليوستات بناءاً على التصميم المسبق للنظام. وإحدى الطرق المتبعة لترتيب الهليوستات هي طريقة الخطوط المستقيمة وتفصل بعضها عن بعض بمسافات منتظمة. هذه المسافات تحدد على أساس اختيار ما يسمى بنسبة تغطية الأرض، وهي النسبة بين المساحة الكلية للمرايا إلى مساحة الحقل. ولا يحبذ استخدام هذه الطريقة، وذلك نتيجة لحدوث تظليل المرايا وإعاقة للأشعة في الحقول ذات نسب تغطية أرضية مرتفعة. ومفهوم التظليل هنا يعني، أن السطح العاكس للهليوستات يقع في مدى مساحة ظل هليوستات أخر، أما مصطلح الإعاقة أو الحجز فيعني به، اصطدام الأشعة المنعكسة من هليوستات بالجهة الخلفية لهليوستات أخر، مما يعوق وصولها إلى الهدف وهو المستقبل المركزي. أما الطريقة الأخرى والتي توضع فيها الهليوستات في خطوط مستقيمة ولكن بمسافات متباينة وغير منتظمة، وبهذا فانه يمكن وضع الهليوستات قريبة من بعضها البعض ما أمكن وبدون تظليل أو إعاقة للأشعة، وذلك على النحو التالي (Elsayed, et al., 1984):

أ) قطر حقل شمال ـ جنوب عند الزوال في أي يوم في السنة.

ب) قطر حقل غرب ـ شرق من t_1 صباحاً حتى t_2 مساءاً بالتوقيت الشمسي، لنقل في يوم تكون فيه زاوية اتجاه الشمس $\phi = 90°$ عكس عقارب الساعة.

إن معايير أخرى يمكن استنباطها بناءاً على التصاميم المستقبلية. في المعيار التالي العلاقات الهندسية للتخطيط السابق أو المسافات الغير متناسقة اشتقت بواسطة (Black, Veatch ،1978).

نعرف في البداية نسب مسافات الهليوستات R_{SY}, R_{SX} ونسب مواضع الهليوستات R_{PY}, R_{PX} كالتالي:

$$R_{SY} = D/S_{NS} \quad (1.9)$$

$$R_{SX} = D/S_{WE} \quad (2.9)$$

$$R_{PY} = Y/T_H \quad (3.9)$$

$$R_{PX} = X/T_H \quad (4.9)$$

حيث؛ D ، قطر الهليوستات، S_{WE}, S_{NS} ، المسافة بين الهليوستات (من المركز إلى المركز)، للاتجاهات الشمال ـ الجنوب والشرق ـ الغرب، على التوالي، T_H، ارتفاع البرج، X ، المسافة من البرج في اتجاه الشرق ـ الغرب، Y، المسافة من البرج في اتجاه الشمال ـ الجنوب.

علاقات الشمال ـ الجنوب

كما هو مبين في الشكل (11.9)، تُحسب المسافة في اتجاه الشمال ـ الجنوب من ثلاث علاقات مختلفة متزامنة للمناطق الثلاث. والتي تُعرف بواسطة المعادلة التالية:

$$Y^* = \pm T_H \tan Z^* \quad (5.9)$$

حيث Z^* ، زاوية سمت الشمس عند الزوال ليوم محدد في السنة. في المنطقة ـ I،

ترتطم الأشعة الشمسية بالمرايا من أعلى المحور العمودي على المرايا وينعكس في اتجاه أسفل المحور العمودي. ولهذا فإن إعاقة الأشعة هي الآلية السائدة في هذه المنطقة. فإذا تنحت الإعاقة في هذه المنطقة، فلن يكون هناك تظليل أو إعاقة. في هذه الحالة العلاقات التالية يمكن استنباطها (أنظر الشكل (12.9 أ)):

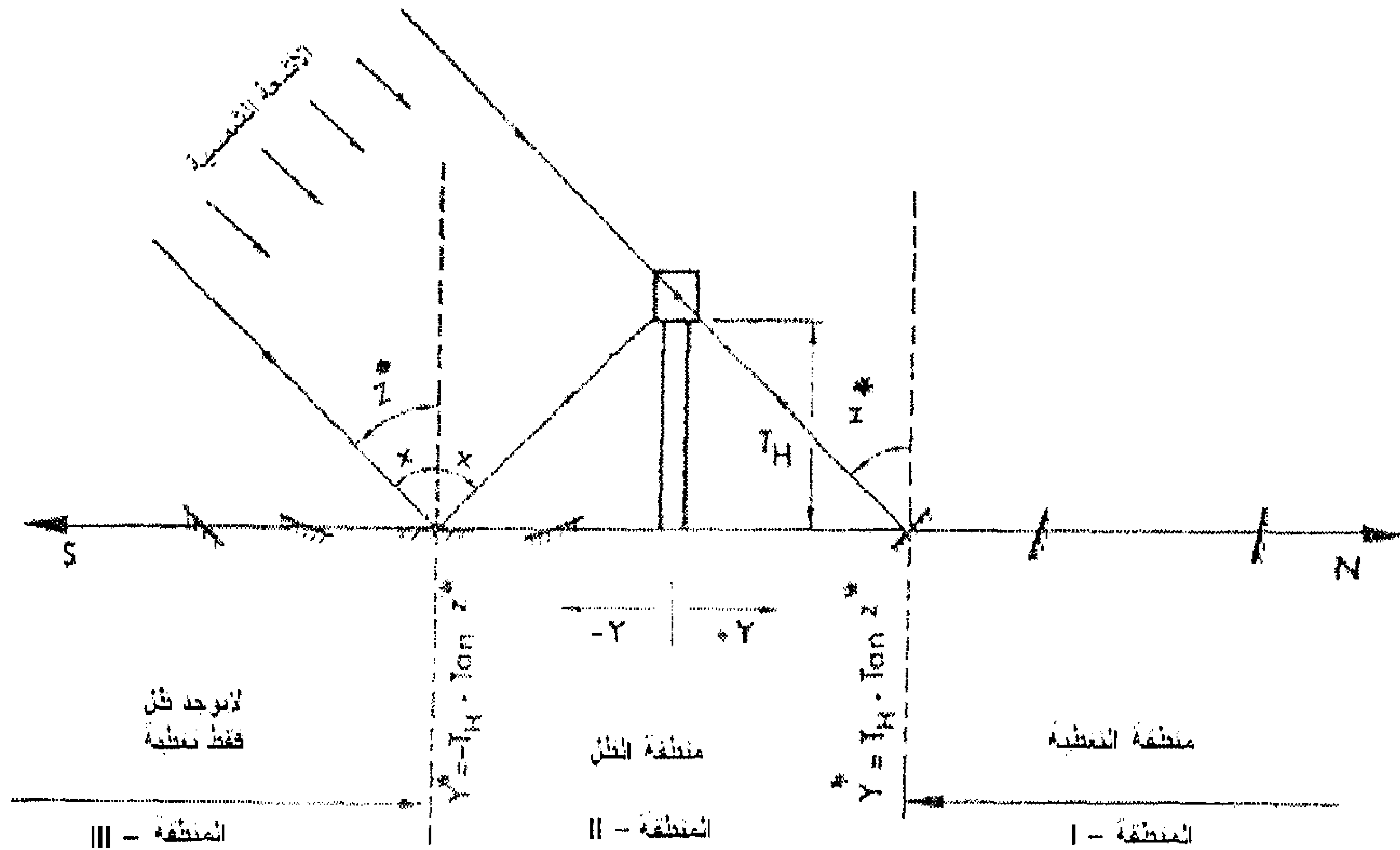
$$d + Z^* + B = B + \alpha + S$$

أو:

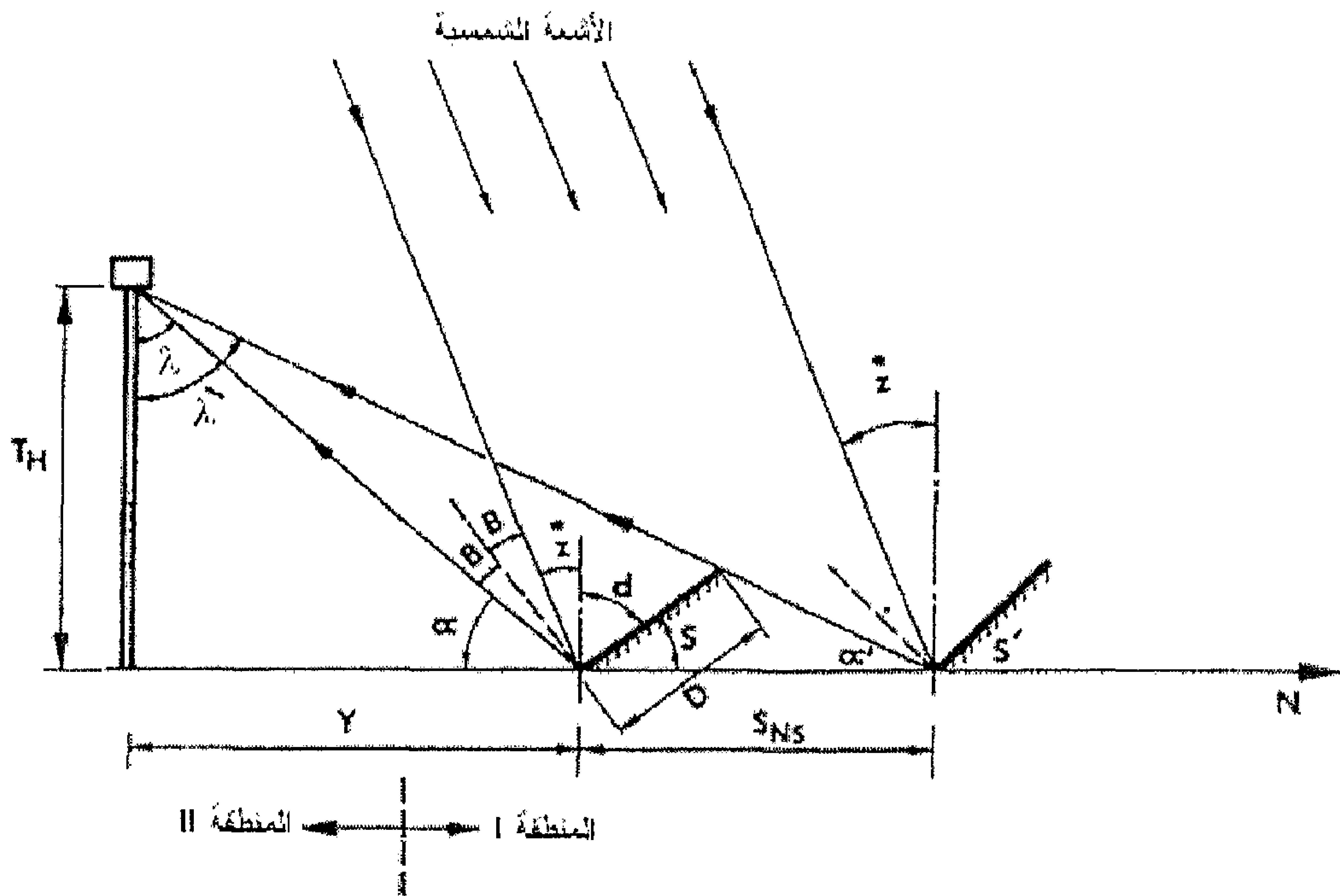
$$d = \alpha + S - Z^* \qquad (6.9)$$

أيضاً:

$$S = \frac{\pi}{2} - d$$
$$= \frac{\pi}{2} - \left(\alpha + S - Z^*\right)$$



شكل (11.9) مخطط نسبة المسافات في حقل الهليوستات الشمالي ـ الجنوبي



شكل (12.9 أ) هندسة تحييد الإعاقة في المنطقة – I في اتجاه الشمال – الجنوب لحقل الهليوستات

$$S = \frac{1}{2}\left(\lambda + Z^*\right) \tag{7.9}$$

$$S' = \frac{1}{2}\left(\lambda' + Z^*\right) \tag{8.9}$$

ولدينا أيضاً من الشكل:

$$\frac{D}{\sin\alpha'} = \frac{S_{NS}}{\sin(\pi - \alpha' - S)}$$

$$\frac{D}{\sin(\pi/2 - \lambda')} = \frac{S_{NS}}{\sin(\pi/2 - S + \lambda')}$$

$$\frac{D}{\cos\lambda'} = \frac{S_{NS}}{\cos(S - \lambda')} \tag{9.9}$$

لأي نظام هليوستات ثنائي ناجح يمكن اعتبار $\lambda \equiv \lambda'$، وهذا يعني أن:

$$\frac{D}{\cos\lambda}=\frac{S_{NS}}{\cos(S-\lambda)} \qquad (10.9)$$

باستخدام المعادلة (7.9)، نحصل على:

$$\frac{D}{\cos\lambda}=\frac{S_{NS}}{\cos\left[1/2\left(Z^{*}-\lambda\right)\right]} \qquad (11.9)$$

أو:

$$R_{SY}=\frac{D}{S_{NS}}=\frac{\cos\lambda}{\cos\left[1/2\left(Z^{*}-\lambda\right)\right]}$$

وبهذا:

$$R_{SY}=\frac{\cos\left(\tan^{-1}R_{PY}\right)}{\cos\left[1/2\left(Z^{*}-\tan^{-1}R_{PY}\right)\right]} \qquad (12.9)$$

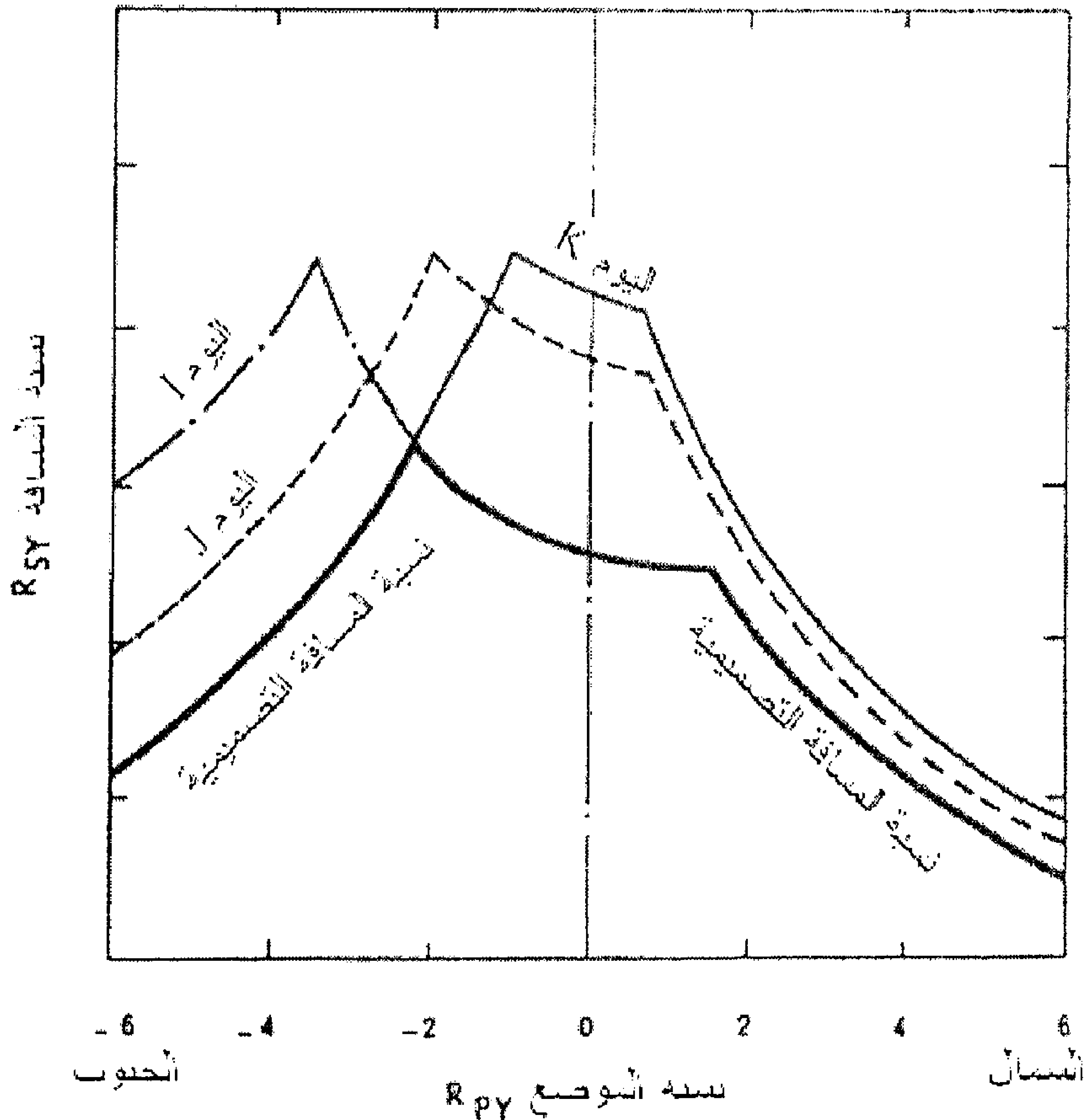
في المنطقة ـ II؛ ترتطم الأشعة الساقطة دائماً بالمرايا من أسفل الخط العمودي على المرايا وتنعكس في الاتجاه العلوي للخط. ولهذا فالتظليل هو الآلية السائدة في هذه المنطقة. وبنفس التحليل المدرج للمنطقة ـ I، فالعلاقة التالية تستخدم لتحييد التظليل في المنطقة ـ II:

$$R_{SY}=\frac{\cos Z^{*}}{\cos\left[1/2\left(Z^{*}-\tan^{-1}R_{PY}\right)\right]} \qquad (13.9)$$

وللمنطقة ـ III، توضع المرايا بصورة تكون فيها إعاقة الأشعة فقط هي المتوقعة للهليوستات في المستوى العادي. ولتحييد الإعاقة فإنه يجب فصل الهليوستات بمسافات تبعاً للعلاقة التالية:

$$R_{SY}=\frac{\cos\left(\tan^{-1}\left|R_{PY}\right|\right)}{\cos\left[1/2\left(Z^{*}+\tan^{-1}\left|R_{PY}\right|\right)\right]} \qquad (14.9)$$

نسب الفراغ في المناطق I، II، III معطاة بالمعـادلات (12.9)، (13.9) و (14.9)، على التوالي، بدلالة زاوية السمت للشمس Z^* عند الزوال ليوم محدد في السـنة، ونسبة الموضع R_{PY}. وبهذا فإن قيمة R_{SY} تعتمد على كل من R_{PY} وعلى اليـوم في السنة. مثلت العلاقة بين R_{SY}، R_{PY} لعدة أيام في السـنة في الشـكل (12.9 ب). لتحقيق الشرط الذي عنده لا يحدث أي تظليل أو إعاقة عند الزوال الشمسـي لأي يوم في السنة في حقل شمـالي ـ جنـوبي، فيجـب اختيـار القـيم الصـغرى لنسـب المسافات (بمعنى أن تكون المسافات الفاصلة بين الهليوستات كبيرة) لكل قيمـة مـن نسبة الموضع كما هو مشار إليه في الشكل (12.9 ب).



شكل (12.9 ب) العلاقة بين نسب الموضع والمسافة في اتجاه الشمال ـ الجنوب

علاقات الشرق ـ الغرب

الشكل (13.9) يبين هندسة الحقل الشرقي ـ الغربي، وهي مماثلة لتلك في شكل (11.9) غير أن المحور ممتد على طول الشرق ـ الغرب. بنفس السياق، يمكن تقسيم الشكل الهندسي إلى ثلاث مناطق طبقاً للمعادلة:

$$X = T_H \tan Z \qquad (15.9)$$

حيث: Z، تمثل زاوية سمت الشمس عند زمن t_1 صباحاً ليوم تكون فيه زاوية اتجاه الشمس $\phi = 90°$ (مقاسة مع عقارب الساعة من الشمال عند الزمن t_1 بالتوقيت الشمسي). وبهذا فإن إتجاه أشعة الشمس تتغير من الصباح إلى ما بعد الزوال، ولذا فإنه من الواضح أن المنطقة ـ III (المنطقة القريبة للأشعة الشمسية) في الحقل الشمالي ـ الجنوبي سيفصلها مسافات صغيرة. وبهذا فان الحالة الحالية تملي علينا متطلبات لتوزيع المسافات بين الهليوستات في الحقل الشرقي ـ الغربي كالتالي: مسافات قريبة للمنطقة الشرقية في الصباح بينما تتطلب المنطقة الغربية مسافات قريبة في فترة ما بعد الزوال. العلاقات مشابهة لتلك المستنبطة لحقل شمالي ـ جنوبي والتي يمكن استخدامها كالتالي:

للمنطقة الشرقية أو الغربية:

$$R_{SX} = \frac{\cos\left(\tan^{-1}|R_{PX}|\right)}{\cos\left[1/2\left(Z - \tan^{-1}|R_{PX}|\right)\right]} \qquad (16.9)$$

للمنطقة الوسطى:

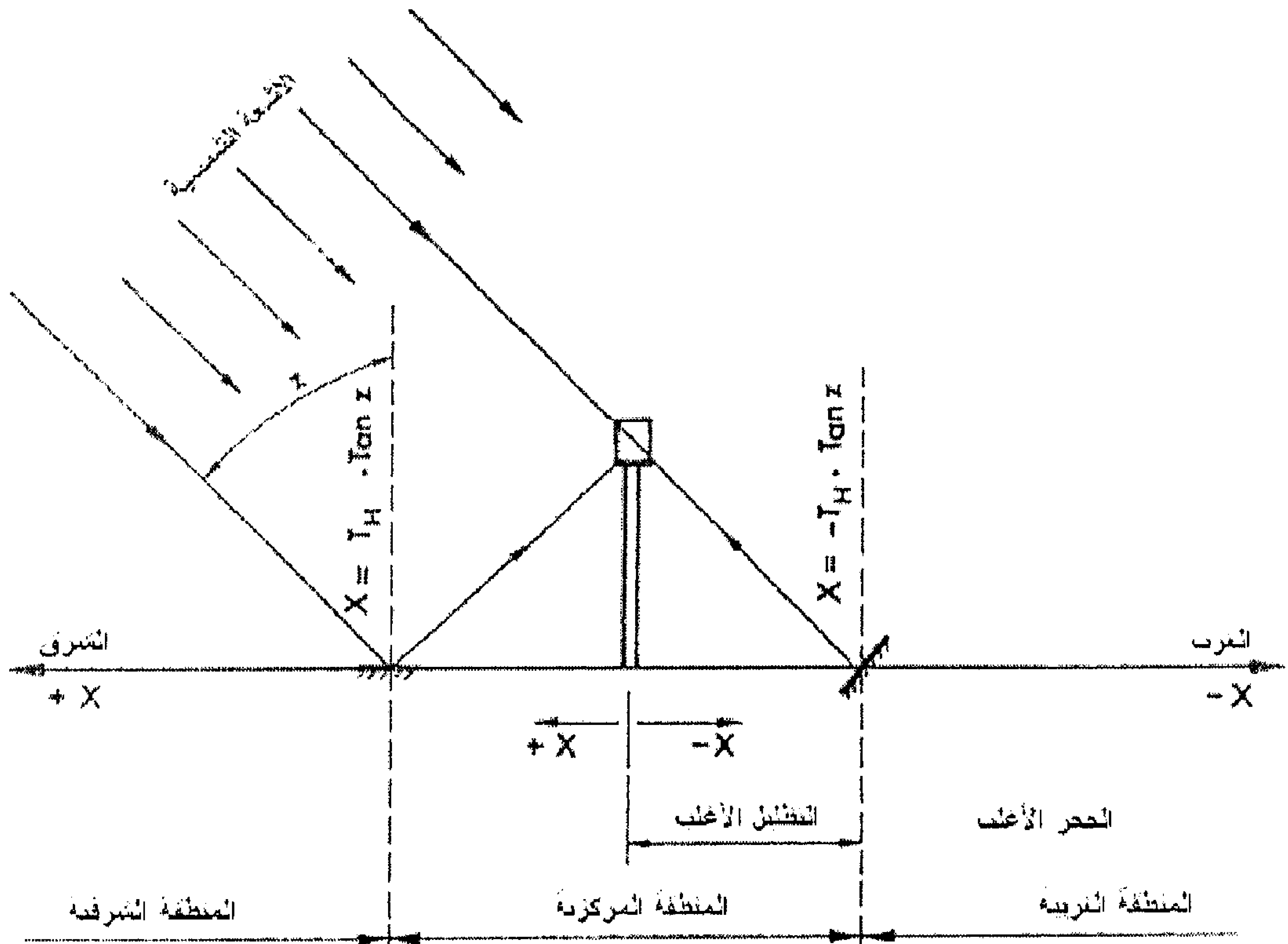
$$R_{SX} = \frac{\cos Z}{\cos\left[1/2\left(Z - \tan^{-1}|R_{PX}|\right)\right]} \qquad (17.9)$$

وهذا يعني أن المسافات لحقل شرقي ـ غربي متماثلة حول محور الشمال ـ الجنوب.

مثال 1.9

في دراسة لتصميم الأداء الأمثل لمستقبل مركزي لمحطة الطاقة الشمسية في مدينة تقع على خط عرض °21.5 شمالاً، تم اختيار المواصفات التصميمية التالية:

ارتفاع البرج، T_H	=	60 m
قطر الهليوستات، D	=	4 m
نصف قطر الحقل، R	=	40 m
عدد الهليوستات	=	2000



شكل (13.9) مخطط نسبة المسافات في حقل الهليوستات الشرقي – الغربي

أرسم:

أ) تغير نسبة المسافة R_{SY} مع نسبة الموضع R_{PY} على طول الحقل الشمالي - الجنوبي.

ب) تغير نسبة المسافة R_{SX} مع نسبة الموضع R_{PX} على طول الحقل الشرقي - الغربي.

أستخدم المعايير التالية لتحديد نسب المسافات والمواضع:

أ) لا يوجد تظليل ولا إعاقة على طول قطر الحقل الشمالي - الجنوبي، عند الزوال الشمسي ليوم 3 مايو.

ب) لا يوجد تظليل ولا إعاقة على طول قطر الحقل الشرقي - الغربي من الساعة 9:00 صباحاً حتى الساعة 3:00 مساءاً بالتوقيت الشمسي، ليوم 3 مايو.

الحل:

زاوية سمت الشمس Z يمكن حسابها من العلاقة التالية:

$$\cos Z = \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos h$$

حيث: L - زاوية خط العرض، δ - زاوية ميل الشمس، h - زاوية الساعة.

فإن زاوية ميلان الشمس تُحسب من المعادلة:

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(284+n)\right]$$

حيث n هي رقم اليوم، وليوم 3 مايو تكون $n = 123$. إذن:

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(284+123)\right] = 15.51^\circ$$

وزاوية الساعة h تحسب من العلاقة التالية:

$$h = \pm\frac{1}{4} \times \text{(مجموع الدقائق عن الزوال الشمسي)}$$

وبهذا، تحسب زاوية سمت الشمس من الساعة 9:00 صباحاً و الساعة 12:00 الزوال بالتوقيت الشمسي. وتكون النتائج كالتالي:

التوقيت الشمسي	h	Z
9:00 صباحاً	45-	43
12:00 الزوال	0	6

الحقل الشمالي ـ الجنوبي

ينقسم هذا الحقل إلى ثلاث مناطق تبعاً للعلاقة التالية:

$$R_{PY}^{*} = \pm \tan Z^{*}$$

حيث: $R_{PY}^{*} = \pm \tan(6)$

$$= \pm 0.1$$

هذا يعني أن:

المنطقة ـ I عندما $R_{PY} > 0.1$

المنطقة ـ II عندما $0.1 \geq R_{PY} \geq -0.1$

المنطقة ـ III عندما $R_{PY} < -0.1$

تُحسب بعدها قيم R_{SY} من المعادلات التالية:

المنطقة ـ I :
$$R_{SY} = \frac{\cos\left(\tan^{-1} R_{PY}\right)}{\cos\left[1/2\left(Z^{*} - \tan^{-1} R_{PY}\right)\right]}$$

المنطقة ـ II :
$$R_{SY} = \frac{\cos Z^{*}}{\cos\left[1/2\left(Z^{*} - \tan^{-1} R_{PY}\right)\right]}$$

المنطقة ـ III :
$$R_{SY} = \frac{\cos\left(\tan^{-1}\left|R_{PY}\right|\right)}{\cos\left[1/2\left(Z^{*} + \tan^{-1}\left|R_{PY}\right|\right)\right]}$$

الحقل الشرقي ـ الغربي

ينقسم هذا الحقل إلى ثلاث مناطق تبعاً للعلاقة التالية:

$$R_{PX} = \pm \tan Z$$

حيث Z تمثل سمت الشمس عند الساعة 9:00 صباحاً. إذن:

$$R_{PX} = \pm \tan 43 = \pm 0.933$$

وهذا يعني أن:

المنطقة الشرقية عندما $R_{PX} > 0.933$

المنطقة الوسطى عندما $R_{PX} > 0.933$

الجدول (1.9) حساب R_{SY} للحقل الشمالي ـ الجنوبي للمثال 1.9

المنطقة ـ III		المنطقة ـ II		المنطقة ـ I	
R_{SY}	R_{PY}	R_{SY}	R_{PY}	R_{SY}	R_{PY}
0.321	-4.0	1.00	-0.1	0.995	0.1
0.359	-3.5	0.999	-0.08	0.982	0.2
0.406	-3.0	0.998	-0.06	0.909	0.5
0.466	-2.5	0.997	-0.04	0.750	1.0
0.544	-2.0	0.996	-0.02	0.613	1.5
0.648	-1.5	0.996	0.0	0.510	2.0
0.783	-1.0	0.995	0.02	0.434	2.5
0.932	-0.5	0.995	0.04	0.376	3.0
0.992	-0.2	0.995	0.06	0.332	3.5
1.00	-0.1	0.995	0.08	0.296	4.0
		0.995	0.1		

المنطقة الشرقية عندما $R_{PX} < -0.933$

تحدد قيم R_{SX} من العلاقات التالية:

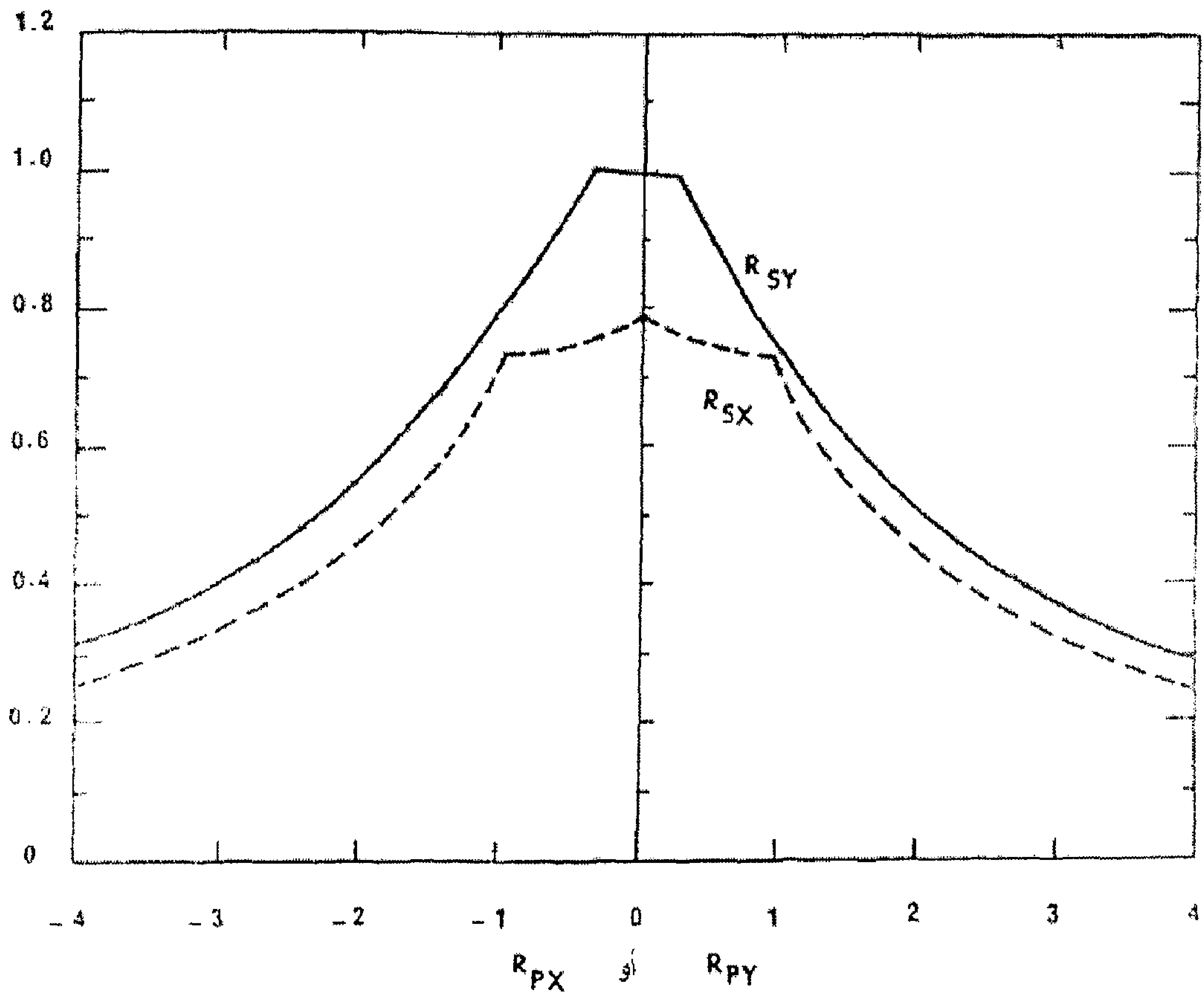
المنطقة الشرقية أو الغربية :

$$R_{SX} = \frac{\cos\left(\tan^{-1}|R_{PX}|\right)}{\cos\left[1/2\left(Z - \tan^{-1}|R_{PX}|\right)\right]}$$

المنطقة الوسطى :

$$R_{SX} = \frac{\cos Z}{\cos\left[1/2\left(Z - \tan^{-1}|R_{PX}|\right)\right]}$$

نتائج الحسابات مدرجة في الجدول (2.9) ومثلت بيانياً في الشكل (14.9).



شكل (14.9) اختلاف نسبة المسافات مع نسبة الموضع للأقطار الشمالية – الجنوبية والشرقية – الغربية للحقل في المثال 1.9

الجدول (2.9) حساب R_{SX} للحقل الشرقي ـ الغربي للمثال 1.9

المنطقة الشرقية أو الغربية		المنطقة الوسطى	
R_{SX}	R_{PX}	R_{SX}	R_{PX}
0.707	± 1.0	0.786	0
0.558	± 1.5	0.772	± 0.1
0.454	± 2.0	0.760	± 0.2
0.381	± 2.5	0.751	± 0.3
0.326	± 3.0	0.744	± 0.4
0.285	± 3.5	0.739	± 0.5
0.253	± 4.0	0.735	± 0.6
		0.733	± 0.7
		0.732	± 0.8
		0.731	± 0.9
		0.731	± 0.933

3.3.9 زوايا ميل واتجاه الهليوستات

في الجزء السابق حُدد موقع كل هليوستات تبعاً لمعايير تصميمية معينة. في هذا الجزء ستُحدد زاويتا الميل والاتجاه لكل هليوستات. التحليلات المدرجة أدناه مدونة في (Mulholland, 1983).

أعتبر نظام الإحداثيات الهندسية لحقل الهليوستات ـ البرج المبين في الشكل (15.9). وحدة المتجه والذي يمثل موضع الشمس بالنسبة إلى نظام الإحداثيات الأصلية ويعطى كالتالي:

$$\begin{aligned}\bar{I} &= \sin Z \cos\phi\,\bar{i} + \sin Z \sin\phi\,\bar{j} + \cos Z\,\bar{k} \\ &= I_1\,\bar{i} + I_2\,\bar{j} + I_3\,\bar{k}\end{aligned} \qquad (18.9)$$

وحدة المتجه للأشعة المنعكسة من الهليوستات إلى المستقبل يُعطى كالتالي (أنظر الشكل (15.9جـ)):

$$\overline{R} = \frac{-X\,\overline{i} - Y\,\overline{j} + T_H\,\overline{k}}{\sqrt{X^2 + Y^2 + T_H^2}}$$
$$= R_1\,\overline{i} + R_2\,\overline{j} + R_3\,\overline{k} \qquad (19.9)$$

معادلة وحدة المتجه $\overline{N}$ لسطح الهليوستات تصبح على الصورة التالية:

$$\overline{N} = \frac{\overline{I} + \overline{R}}{\left|\overline{I} + \overline{R}\right|} = \frac{\overline{I} + \overline{R}}{\left[2 + 2\left(\overline{I} \cdot \overline{R}\right)\right]^{1/2}}$$
$$= \frac{(I_1 + R_1)\,\overline{i} + (I_2 + R_2)\,\overline{j} + (I_3 + R_3)\,\overline{k}}{\left[2 + 2\left(I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3\right)\right]^{1/2}}$$
$$= N_1\,\overline{i} + N_2\,\overline{j} + N_3\,\overline{k} \qquad (20.9)$$

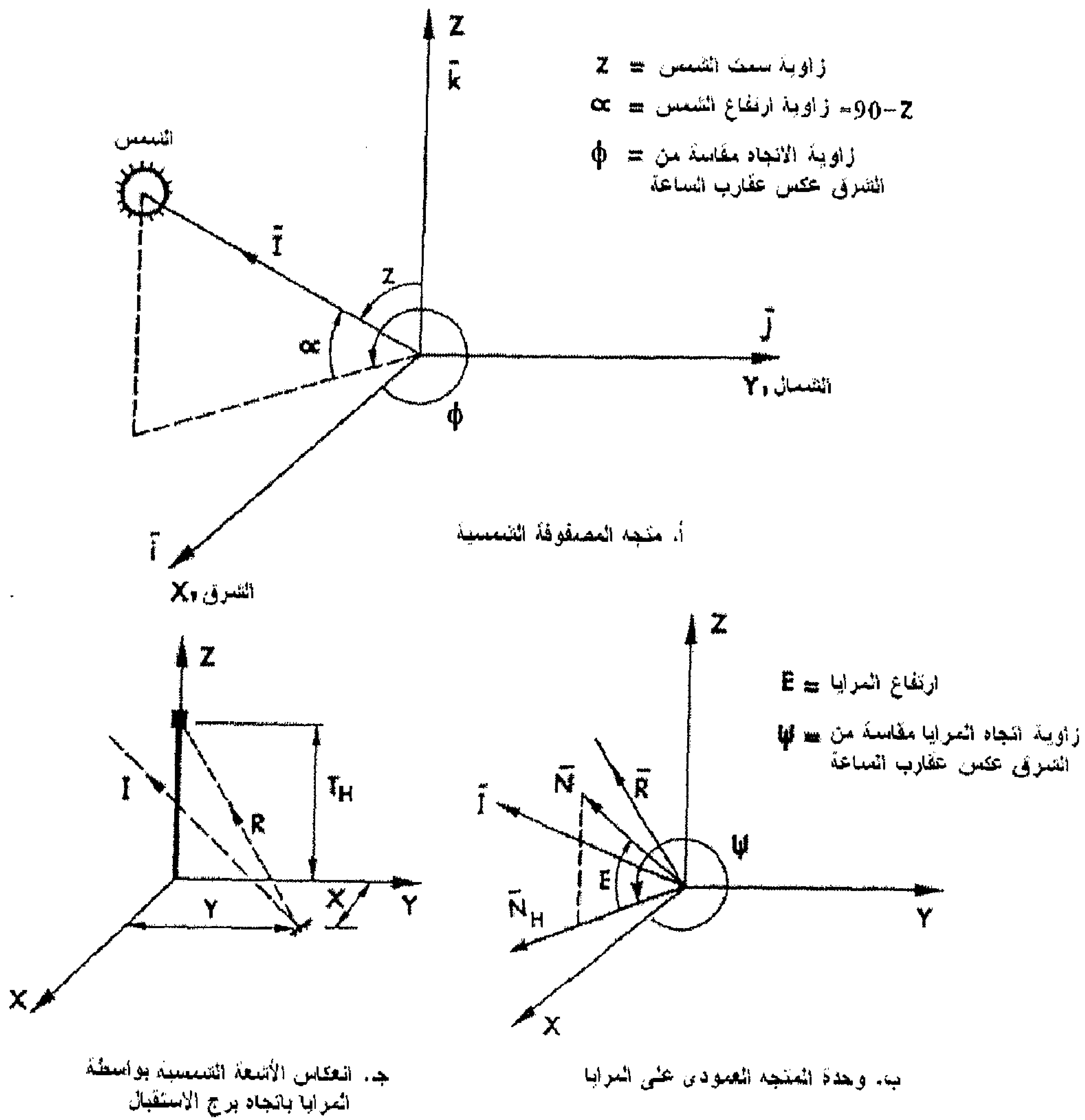
وحدة المتجه $\overline{N}_H$ في المستوى الأفقي ($X - Y$) مباشرة على طول المسقط $\overline{N}$، يكون:

$$\overline{N}_H = \frac{(I_1 + R_1)\,\overline{i} + (I_2 + R_2)\,\overline{j}}{\left[(I_1 + R_1)^2 + (I_2 + R_2)^2\right]^2}$$
$$= N_{H_1}\,\overline{i} + N_{H_2}\,\overline{j} \qquad (21.9)$$

وبهذا فان زاوية المسقط العمودي للهليوستات E يُعطى بالعلاقة التالية:

$$E = \overline{N} . \overline{N}_H = N_1 . N_{H_1} + N_2 . N_{H_2}$$
$$= \frac{\left[(I_1 + R_1)^2 + (I_2 + R_2)^2\right]}{\left[2 + 2\left(I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3\right)\right]^{1/2}} \left[(I_1 + R_1)^2 + (I_2 + R_2)^2\right]^{-1/2}$$
$$E = \sqrt{\frac{(I_1 + R_1)^2 + (I_2 + R_2)^2}{2\left(1 + I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3\right)}}$$

(22.9)



شكل (15.9) نظام الإحداثيات الهندسي لحقل الهليوستات ـ البرج

صياغة أخرى يمكن استنباطها، كالتالي:

$$\sin E = \bar{N} . \bar{k} = N_3$$

بمعنى أن:

$$\sin E = \frac{(I_3 + R_3)}{\sqrt{2(1 + I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3)}} \qquad (23.9)$$

ايضاً، تحدد زاوية اتجاه الهليوستات من أي من الصيغتين التاليتين:

$$\cos\psi = \bar{N}_H . \bar{i} = \frac{(I_1 + R_1)}{\sqrt{(I_1 + R_1)^2 + (I_2 + R_2)^2}} \qquad (24.9)$$

$$\sin\psi = \bar{N}_H . \bar{j} = \frac{(I_2 + R_2)}{\sqrt{(I_1 + R_1)^2 + (I_2 + R_2)^2}} \qquad (25.9)$$

مثال 2.9

حدد زاويتي المسقط والاتجاه على العمودي على سطح هليوستات في الموقع $X = 100$ m و $Y = 150$ m من برج ارتفاعه 50 m عند اللحظة التي تكون فيها زاوية سمت الشمس $Z = 60°$ وزاوية اتجاه الشمس (مقاسة عكس عقارب الساعة من الشرق) $\phi = -45°$.

الحل:

بما أن:

$$Z = 60° \quad , \quad \phi = -45°$$

$$T_H = 50 \quad , \quad X = 100 \quad , \quad Y = 150$$

إذن:

$$I_1 = \sin Z \quad \cos\phi = \sin 60 \quad \cos-45 = 0.6123$$

$$I_2 = \sin Z \quad \sin\phi = \sin 60 \quad \sin-45 = -0.6123$$

$$I_3 = \cos Z = \cos 60 = 0.5$$

$$\sqrt{X^2 + Y^2 + T_H^2} = \sqrt{100^2 + 150^2 + 50^2} = 187.083$$

$$R_1 = \frac{-100}{187} = -0.5345$$

$$R_2 = \frac{-150}{187} = -0.8018$$

$$R_3 = \frac{50}{187} = 0.2673$$

$$\cos E = \sqrt{\frac{(0.6123 - 0.5345)^2 + (-0.6123 - 0.8018)^2}{2(1 - 0.6123 \times 0.5345 + 0.6123 \times 0.8018 + 0.5 \times 0.2673)}}$$

$$= \sqrt{\frac{0.0061 + 1.9997}{2 \times 1.2973}} = 0.879$$

$$E = 28.45^\circ$$

أو:

$$\sin E = N_3 = \frac{I_3 + R_3}{\sqrt{2(1 + I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3)}}$$

$$= \frac{0.5 + 0.2672}{\sqrt{2 \times 1.2973}} = 0.476$$

$$E = 28.45^\circ$$

وهي نفس القيمة المحسوبة سابقاً. تحدد زاوية اتجاه الهليوستات كالتالي:

$$\cos \psi = \frac{I_1 + R_1}{\sqrt{(I_1 + R_1)^2 + (I_2 + R_2)^2}}$$

$$= \frac{0.6123 - 0.5345}{\sqrt{(0.6123 - 0.5345)^2 + (-0.6123 - 0.8018)^2}}$$

$$= \frac{0.0778}{\sqrt{0.00605 + 1.9997}} = 0.0549$$

أو:

$$\sin \psi = \frac{I_2 + R_2}{\sqrt{(I_1 + R_1)^2 + (I_2 + R_2)^2}}$$

$$= \frac{-0.6123 - 0.8018}{\sqrt{(0.6123 - 0.5345)^2 + (-0.6123 - 0.8018)^2}} = -0.9985$$

وبالتالي فإن: $\psi = -87°$

4.3.9 حجم المستقبل

يُعرف مركز سطح الهليوستات بواسطة المتجه التالي:

$$\overline{V}_c = X_c\ \overline{i} + Y_c\ \overline{j} + Z_c\ \overline{k} \tag{26.9}$$

حيث X_c ، Y_c ، Z_c ، تمثل إحداثيات مركز سطح الهليوستات. يعرف المتجه لأي نقطة P على سطح الهليوستات كالتالي:

$$\overline{V}_p = \overline{V}_c + \overline{\mu} \tag{27.9}$$

حيث $\overline{\mu}$ ، يمثل المتجه المعرف لموقع النقطة P على سطح الهليوستات بدلالة مركز الهليوستات. ويعرف المتجه $\overline{\mu}$ كالتالي:

$$\overline{\mu} = \mu_1\ \overline{e}_1 + \mu_2\ \overline{e}_2 \tag{28.9}$$

والآن باختيار $\overline{e}_1$ هي المستوى الأفقي ومعرفة كالتالي:

$$\overline{e}_1 = -\sin\psi\ \overline{i} + \cos\psi\ \overline{j} \tag{29.9}$$

وباختيار $\overline{e}_3$ في الاتجاه العمودي على سطح الهليوستات، بمعنى:

$$\overline{e}_3 = \overline{N} = N_1\ \overline{i} + N_2\ \overline{j} + N_3\ \overline{k} \tag{30.9}$$

وبهذا فإن $\bar{e}_2$ يجب أن تكون:

$$\begin{aligned}\bar{e}_2 &= \bar{e}_3 \times \bar{e}_1 \\ &= -(N_3 \cos\psi)\,\bar{i} - (N_3 \sin\psi)\,\bar{j} + (N_1 \cos\psi + N_2 \sin\psi)\,\bar{k}\end{aligned} \qquad (31.9)$$

وحدة المتجهات $\bar{e}_1$، $\bar{e}_2$ و $\bar{e}_3$ معرفة في الشكل (16.9). صيغة $\bar{V}_p$ تبين موقع النقطة P على سطح الهليوستات، وبالتالي تصبح:

$$\begin{aligned}\bar{V}_p &= \bar{V}_c + \bar{\mu} \\ &= (X_c - \mu_1 N_1 \cos\psi)\,\bar{i} + (Y_c + \mu_2 \cos\psi - \mu_2 N_3 \sin\psi)\,\bar{j} + \\ &\quad + (Z_c + \mu_2 N_1 \cos\psi + \mu_2 N_2 \sin\psi)\,\bar{k}\end{aligned} \qquad (32.9)$$

النقطة r على المستقبل والتي بالنسبة إلى النقطة P على سطح الهليوستات تعرف بواسطة المتجه $\bar{V}_r$، كالتالي:

$$\bar{V}_r = \bar{V}_p + L\,\bar{R} \qquad (33.9)$$

حيث $\bar{R}$ تمثل وحدة المتجه في اتجاه الأشعة المنعكسة من النقطة P على سطح الهليوستات إلى النقطة r على المستقبل. والطول L يمثل المسافة بين النقطتين P و r، وتعطى بالعلاقة التالية:

$$L = \left[(X_r - X_p)^2 + (Y_r - Y_p)^2 + (Z_r - Z_p)^2\right]^{1/2} \qquad (34.9)$$

حيث الرموز السفلية r و p تشير إلى النقاط r و P على التوالي.

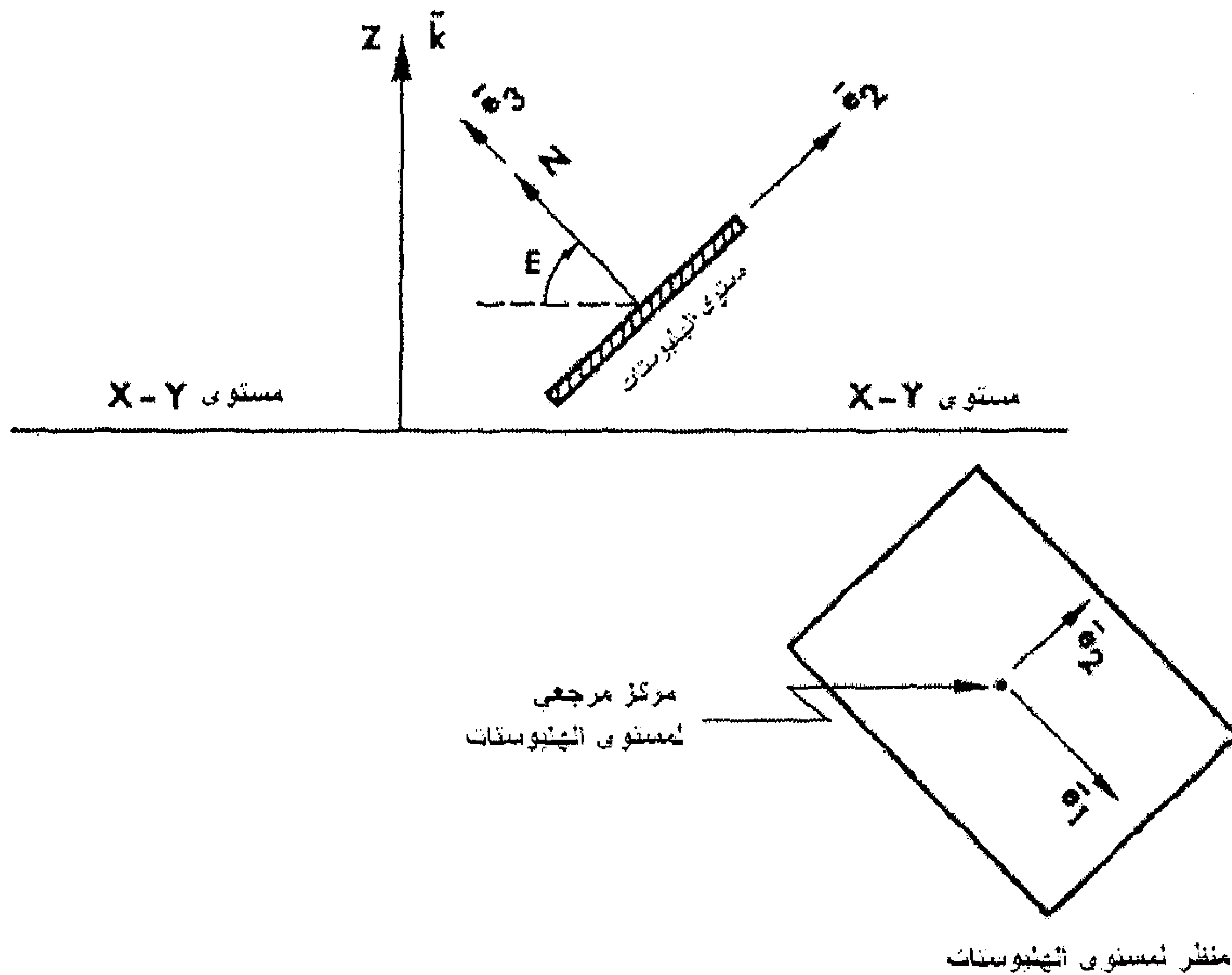
باستخدام المعادلات (19.9)، (32.9) و (33.9)، فإن إحداثيات صورة النقطة p على المستقبل تكون:

$$X_r = X_c - \mu_1 \sin\psi - \mu_2 N_3 \cos\psi + L\,R_1 \qquad (35.9)$$

$$Y_r = Y_c + \mu_1 \cos\psi - \mu_2 N_3 \sin\psi + L\,R_2 \qquad (36.9)$$

$$Z_r = Z_c + \mu_2 N_1 \cos\psi + \mu_2 N_2 \sin\psi + L\,R_3 \qquad (37.9)$$

تُحدد الإحداثيات X_r , Y_r , Z_r مـن المعـادلات السـابقة طالمـا تم تعـيين مستوى المستقبل. استعمال المعادلات السابقة مبينة في المثال أدناه.



شكل (16.9) تعريف وحدة المتجهات $\overline{e}_1$ ، $\overline{e}_2$ و $\overline{e}_3$ ومستوى الهليوستات

مثال 3.9

في المثال السـابق، كـان حجـم الهليوسـتات $5 \times 6 \text{ m}^2$ (6 m في الاتجـاه الأفقـي). الأشعة المنعكسة والتي تستقبل من قبل أحدى جوانب مسـتقبل مسـتطيل الشـكل. معادلة سطح هذا الجانب من المستطيل تعطـى كالتـالي: $Y = 2 \text{ m}$. أوجـد موقـع صورة الحافات الأربع للهليوستات.

الحل:

بأخذ المركز الهندسي للهليوستات هو نفسه منتصف الهليوستات، وبهذا:

$$X_c = 100 \text{ m} \quad , \quad Y_c = 150 \text{ m} \quad , \quad Z_c = 0$$

$$Y_r = 2 \text{ m}$$

من شكل (17.9) يمكن كتابة:

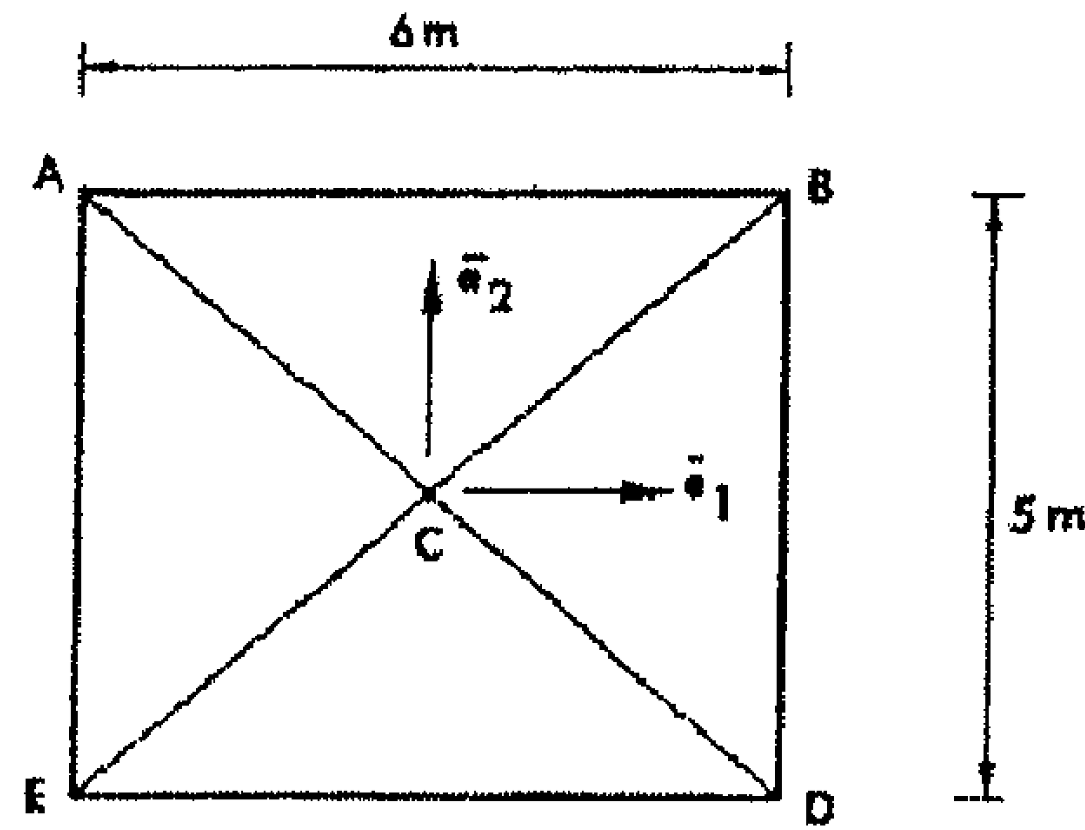
$$\bar{\mu}_c = 0$$

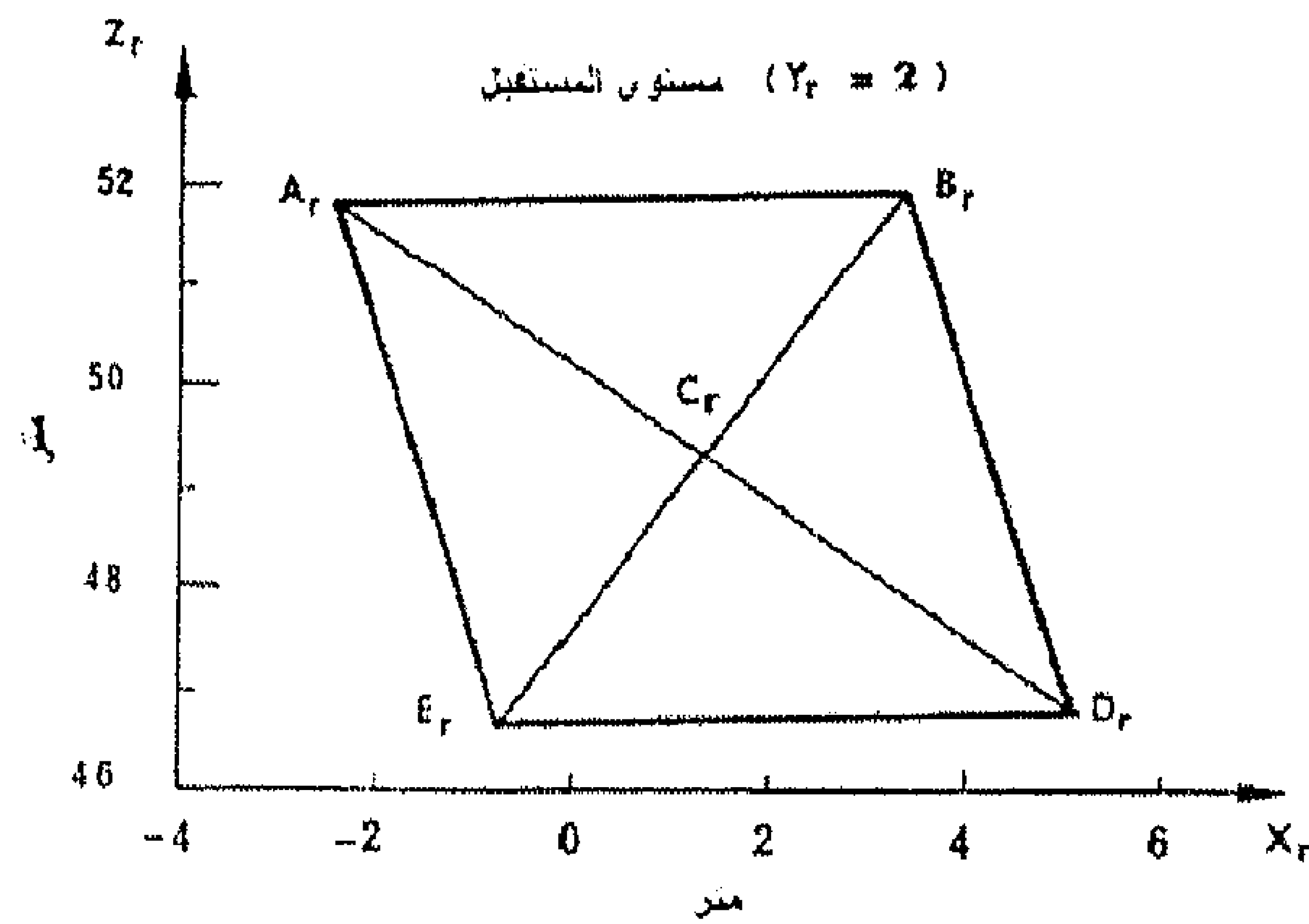
$$\bar{\mu}_A = -3\,\bar{e}_1 + 2.5\,\bar{e}_2$$

$$\bar{\mu}_B = 3\,\bar{e}_1 + 2.5\,\bar{e}_2$$

$$\bar{\mu}_D = 3\,\bar{e}_1 - 2.5\,\bar{e}_2$$

$$\bar{\mu}_E = -3\,\bar{e}_1 - 2.5\,\bar{e}_2$$





شكل (17.9) مستويات الهليوستات والمستقبل للمثال (3.9)

حيث:

$$\overline{\mu} = \mu_1\ \overline{e}_1 + \mu_2\ \overline{e}_2$$

زمن المثال السابق، لدينا:

$$\psi = -87^\circ$$

$$N_1 = \frac{I_1 + R_1}{[2\ (1 + I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3)]^{1/2}} = \frac{0.6123 - 0.5345}{1.6107} = -0.048$$

$$N_2 = \frac{I_2 + R_2}{[2\ (1 + I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3)]^{1/2}} = \frac{-0.6123 - 0.8017}{1.6107} = -0.878$$

$$N_3 = 0.4764$$

$$(R_1\ , R_2\ , R_3) = (-0.5345\ , -0.8018\ , 0.2673)$$

وبما أن:

$$\overline{V}_r = \overline{V}_p + L\ \overline{R}$$

إذن:

$$X_r = X_c - \mu_1 \sin\psi - \mu_2\ N_3 \cos\psi + L\ R_1$$

$$Y_r = Y_c + \mu_1 \cos\psi - \mu_2\ N_3 \sin\psi + L\ R_2$$

$$Z_r = Z_c + \mu_2\ N_1 \cos\psi + \mu_2\ N_2 \sin\psi + L\ R_3$$

يُعرف مستوى المستقبل عند $Y_r = 2$، وبالتالي فإن المعادلات السابقة من الأفضل صياغتها على الصورة التالية:

$$X_r = (X_c - \mu_1 \sin\psi - \mu_2\ N_3 \cos\psi) + \\ + (Y_r - Y_c - \mu_1 \cos\psi + \mu_2\ N_3 \sin\psi)\frac{R_1}{R_2}$$

وأيضاً:

$$Z_r = (Z_c + \mu_2\ N_1\ \cos\psi + \mu_2\ N_2\ \sin\psi) +$$
$$+ (Y_r - Y_c - \mu_1\ \cos\psi + \mu_2\ N_3\ \sin\psi)\frac{R_3}{R_2}$$

بالتعويض في قيم Z_c , Y_c , X_c , ψ , N_3 , N_2 , N_1 , R_3 , R_2 , R_1 ، نحصل على:

$$X_r = [100 - \sin(-87)\ \mu_1 - 0.4764 \times \cos(-87)\ \mu_2] +$$
$$+ [2 - 150 - \cos(-87)\ \mu_1 + 0.4764 \times \sin(-87)\ \mu_2]\frac{(-0.5345)}{(-0.8018)}$$

$$= 1.339 + 0.964\ \mu_1 - 0.342\ \mu_2$$

وأيضاً:

$$Z_r = [0 + 0.048 \times \cos(-87)\ \mu_2 - 0.878 \times \sin(-87)\ \mu_2] +$$
$$+ [2 - 150 - \cos(-87)\ \mu_1 + 0.4764 \times \sin(-87)\ \mu_2]\frac{(0.2673)}{(-0.8018)}$$

$$= 49.34 + 0.017\ \mu_1 + 1.038\ \mu_2$$

حسابات Z_r , X_r لعدد من النقاط على سطح الهليوستات معطاة كالتالي:

النقطة	μ_1	μ_2	X_r	Z_r	Y_r
A	0	0	1.34	49.34	2
B	-3	2.5	-2.41	51.88	2
C	3	2.5	3.38	51.99	2
D	3	-2.5	5.09	46.80	2
E	-3	-2.5	-0.70	46.70	2

للتأكد من الحسابات، تُحسب قيمة Y_r المصاحبة لكل نقطة على سطح الهليوستات من المعادلة التالية ثم نقارنها بالقيمة $Y_r = 2$،

$$Y_r = Y_c + \mu_1\ \cos\psi - \mu_2\ N_3\ \sin\psi + L\ R_2$$

$$Y_r = 150 + 0.052\ \mu_1 + 0.476\ \mu_2 - 0.8018\ L$$

وبما أن:

$$L = \left[(X_r - X_p)^2 + (Y_r - Y_p)^2 + (Z_r - Z_p)^2\right]^{1/2}$$

وأيضاً:

$$X_p = X_c - \mu_1 \sin\psi - \mu_2\ N_3 \cos\psi$$

$$Y_p = Y_c + \mu_1 \cos\psi - \mu_2\ N_3 \sin\psi$$

$$Z_p = Z_c + \mu_2\ N_1 \cos\psi + \mu_2\ N_2 \sin\psi$$

وبهذا فإنه:

$$X_p = 100 + 0.999\ \mu_1 - 0.025\ \mu_2$$

$$Y_p = 150 + 0.052\ \mu_1 + 0.476\ \mu_2$$

$$Z_p = 0.879\ \mu_2$$

وتكون النتيجة:

Y_r	L	Z_p	Y_p	X_p	النقطة
2	184	0	150	100	A
2	185.88	2.20	151.03	96.94	B
2	186.27	2.20	151.34	102.93	C
2	183.30	-2.20	148.97	103.06	D
2	182.91	-2.20	148.65	97.07	E

تطابق النتائج يدل على صحة الحسابات

5.3.9 أنواع المستقبلات

هناك نوعان من المستقبلات الشائعة الاستخدام في تقنية أبراج الطاقة الشمسية. وهما المستقبل المعرض مباشرة (الخارجي) و النوع المحصور (المجوف).

المستقبل المعرض مباشرة للأشعة، غالباً ما يكون اسطوانياً بحيث تسقط الطاقة مباشرة على السطح الخارجي للأسطوانة. وتحتوي الأسطوانة على عدد من الألواح الطولية المنفصلة، كل لوح يعتبر مجموعة من الأنابيب الصغيرة الأقطار والتي من خلالها يمر مبرد المستقبل (على سبيل المثال ماء). أما النوع المجوف من المستقبلات فهو عبارة عن فتحة والتي ينفذ من خلالها الفيض الشمسي متمركزاً في البؤرة. بينما تتولى الأسطح الداخلية للتجويف عملية امتصاص الطاقة ثم تنقلها إلى الواح المبادل الحراري لإتمام عملية غليان وتحميص الماء.

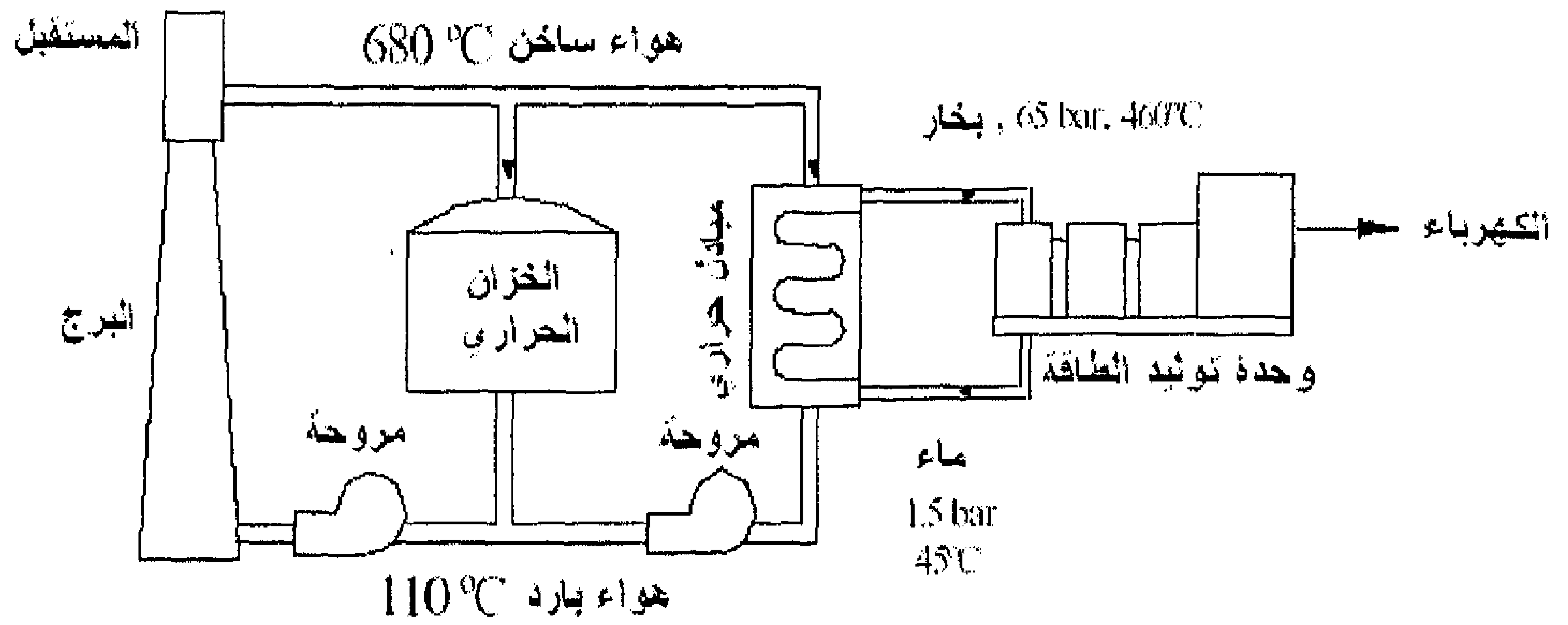
بمقارنة هذين النوعين من المستقبلات، يمكن استنتاج الملاحظات التالية :(Hiderbrandt, Dasgupta, 1980)

1. يمتلك النوع المجوف كفاءة ضوئية أعلى من النوع الخارجي، حيث يمكن للأشعة أن تنعكس عدة مرات داخل التجويف وبالتالي تحدث عملية امتصاص لكمية كبيرة من الأشعة الساقطة.
2. مساحة التبادل الحراري المطلوبة في النوع المجوف أكبر بعدة مرات من تلك المطلوبة في النوع الخارجي، وهذا يجعل من المستقبل المجوف أثقل وزناً وأغلى سعراً من النوع الخارجي.
3. من عيوب المستقبل المجوف أن واجهته الأمامية محصورة بين $120 \div 90^\circ$ من زاوية الرؤية. بعكس المستقبلات الخارجية فان لديها زاوية الرؤية 360° وبالتالي يمكن أن تكون الهليوستات محاطة في الحقل. وبالتالي ولرؤية نفس المساحة، فان فتحة المجوف يجب أن تقع أعلى من مستقبل الخارجي بنسبة $50 \div 30\%$.

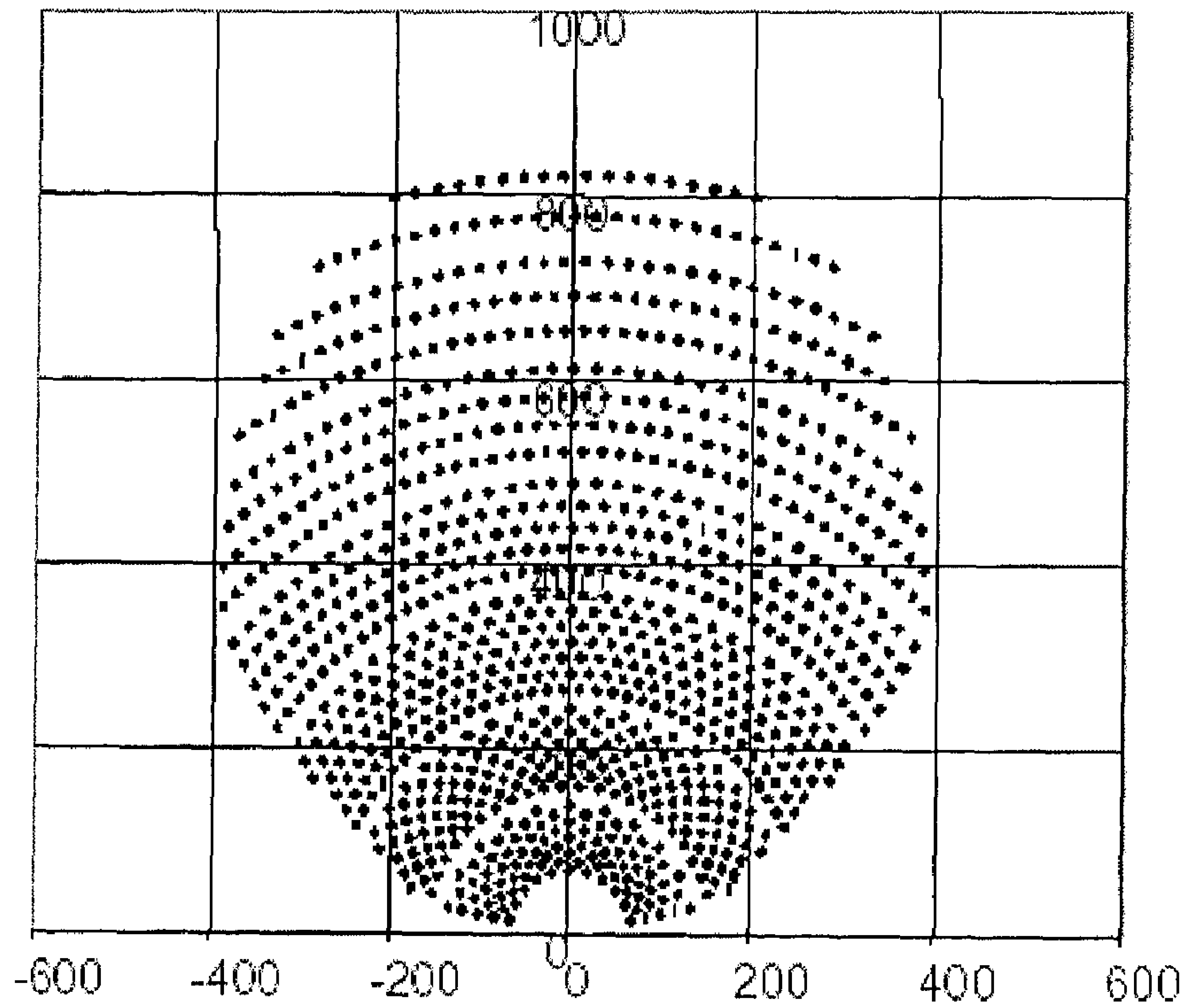
هذه المقارنة تبين أن المستقبلات الجوفة أكبر كفاءة حرارية وبالتالي يجب استخدامها في كل التطبيقات. إلا أن الفيصل في الموضوع يكون الكلفة الفعلية للنظام، وبالتالي كلا من الكفاءة الحرارية وكفاءة الهليوستات يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار. ونتيجة لهذه الأسباب فان المستقبلات الخارجية تصبح أكثر جذباً وقد تكون أهم من المستقبلات الجوفة.

6.3.9 المواصفات الفنية التصميمية والتشغيلية لمحطة برجية شمسية

سرد (Manuel, et al., 2000) المعلومات التصميمية الخاصة بمحطة برجية شمسية بقدرة 10 MW تعمل على الهواء كالمبينة في الشكل (18.9). وهو جزء من مشروع PS10 (Planta Solar 10) لتصميم وإنشاء وتشغيل المحطة الأولى من نوعها في القطاع التجاري بقدرة 10 MW بنظام المستقبلات المركزية الشمسية لإنتاج الطاقة الكهربائية المربوطة مع الشبكة العامة للكهرباء العاملة على الهواء كمائع تشغيل أساسي. سيتم بناء المحطة في مدينة Casa-Quemada (خط عرض 37.2°) بأسبانيا. مخطط حقل الهليوستات مبين إحداثياً في الشكل (19.9). والمواصفات التصميمية للمحطة الشمسية PS10 مدرجة في الجدول (3.9). يُركز الإشعاع الشمسي بواسطة حقل الهليوستات من نوع Sanlucar – 90 المصنعة من قبل شركة INABENSA، ومواصفات الهليوستات المستخدمة في محطة PS10 مدرجة في الجدول (4.9). صورة للهليوستات المستخدمة في محطة PS10 مبينة في الشكل (20.9). الجدول (5.9) يبين المحطات التجريبية العاملة في العالم والقدرة الإنتاجية وتاريخ الإنشاء.



شكل (18.9) مخطط لسريان الموائع العاملة في محطة توليد بخارية برجية تعمل على الهواء



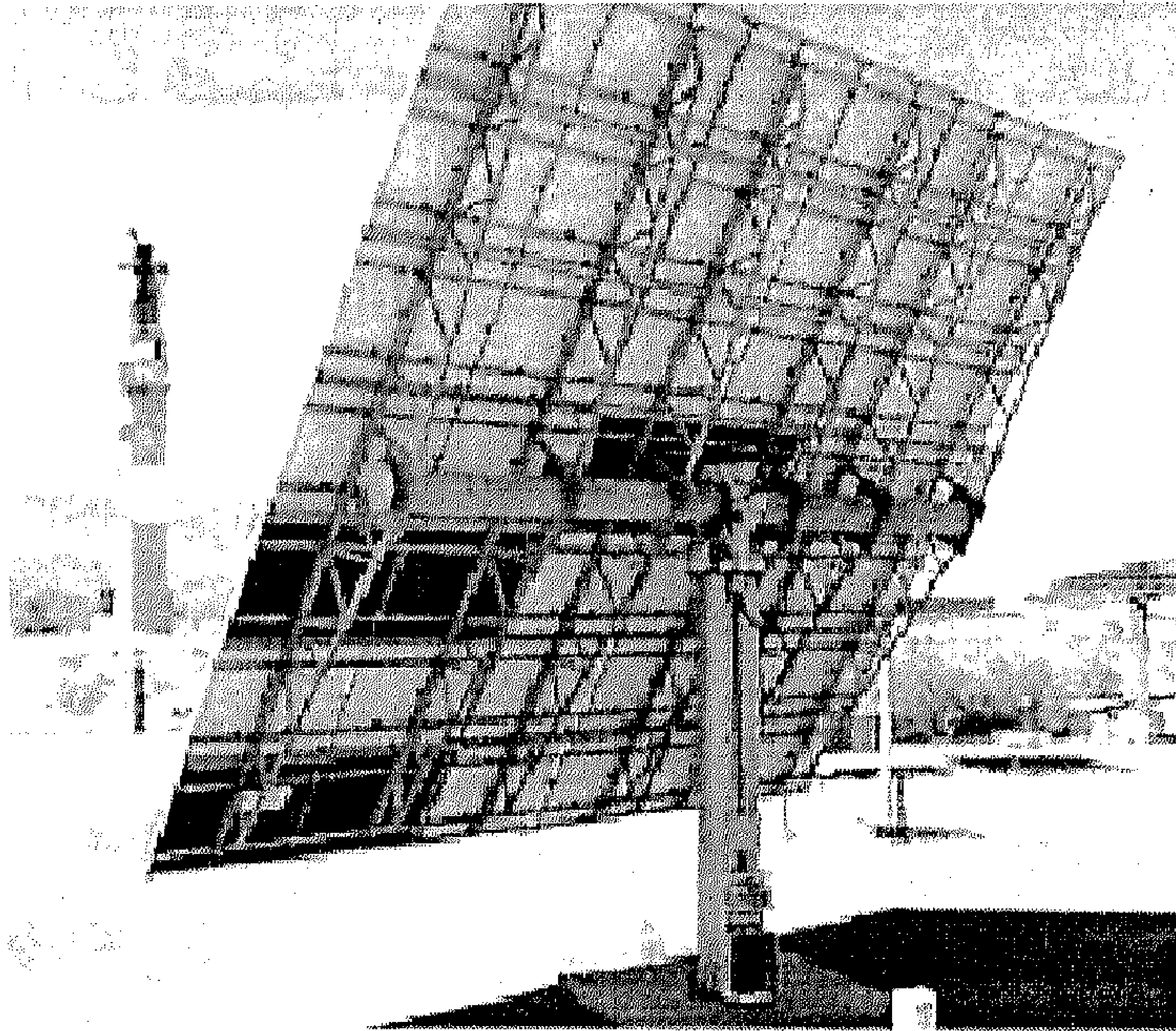
شكل (19.9) مخطط حقل الهليوستات للمحطة الشمسية PS10

جدول (3.9) المواصفات التصميمية للمحطة الشمسية PS10

الإشعاع الشمسي السنوي		$2063\ kWh/m^2$
ساعة ويوم التصميم		355 عند الزوال
الإشعاع الشمسي المعتمد للتصميم		$850\ W/m^2$
القدرة المصممة		10 MWe
تضاعف الأشعة الشمسية		1.15
ارتفاع البرج		90 m
عدد الهليوستات/ المساحة العاكسة للهليوستات		$981/91\ m^2$
المعدل السنوي لانعكاسية الهليوستات		0.90
البعد البؤري		500 m
شكل المستقبل		نصف اسطواني
قطر المستقبل/ ارتفاع المستقبل		10.5 m /10.5 m
	نقطة التصميم	**الموازنة السنوية**
القدرة/ الطاقة الساقطة على الأسطح العاكسة	75.88 MW	183.50 GWh
الكفاءة الضوئية لحقل الهليوستات	0.729	0.647
إجمالي القدرة/ الطاقة الساقطة على المستقبل	55.27 MW	118.72 GWh
كفاءة المستقبل ودورة الهواء	0.740	0.614
القدرة/ الطاقة المنتقلة إلى المائع العامل	40.92 MW	72.90 GWh
القدرة/ الطاقة المنتقلة إلى الخزان	5.34 MW	
القدرة/ الطاقة المنتقلة إلى التوربين	35.58 MW	72.90 GWh
كفاءة التحويل الحراري ـ الكهربائي	0.309	0.303
إجمالي القدرة/ الطاقة الكهربائية	11.00 MW	22.09 GWh
الخسائر الجانبية	1.00 MW	2.89 GWh
صافي القدرة/ الطاقة الكهربائية	10.00 MW	19.20 GWh

جدول (4.9) المواصفات الفنية للهليوستات Sanlucar – 90

المساحة بالمتر	$H9.57\ m \times W9.67\ m$
المرايا المكونة للهليوستات (الحجم والعدد)	المرايا $H1.35\ m \times W3.21\ m = 4.33\ m^2$ عدد المرايا $H7 \times W3 = 21$ المساحة العاكسة $21 \times 4.33\ m^2 = 91\ m^2$
تركيب المرايا	المرايا مثبته على هيكل فولاذي بمسامير فولاذية
الزجاج (الحجم)	$H1.35\ m \times W3.21\ m \times 3\ mm$
الانعكاسية	0.92
محرك الاتجاه	Winsmith, worm-gear
محرك الارتفاع	Winsmith, worm-gear
نوع التحكم	CIEMAT/INABENSA
نوعية الأساسات	اسمنت $0.5\ m\ \phi$
الوزن بالكيلوجرام	3500 kg بدون الأساسات



شكل (20.9) صورة لهليوستات Sanlucar – 90 المخصصة لمحطة PS10

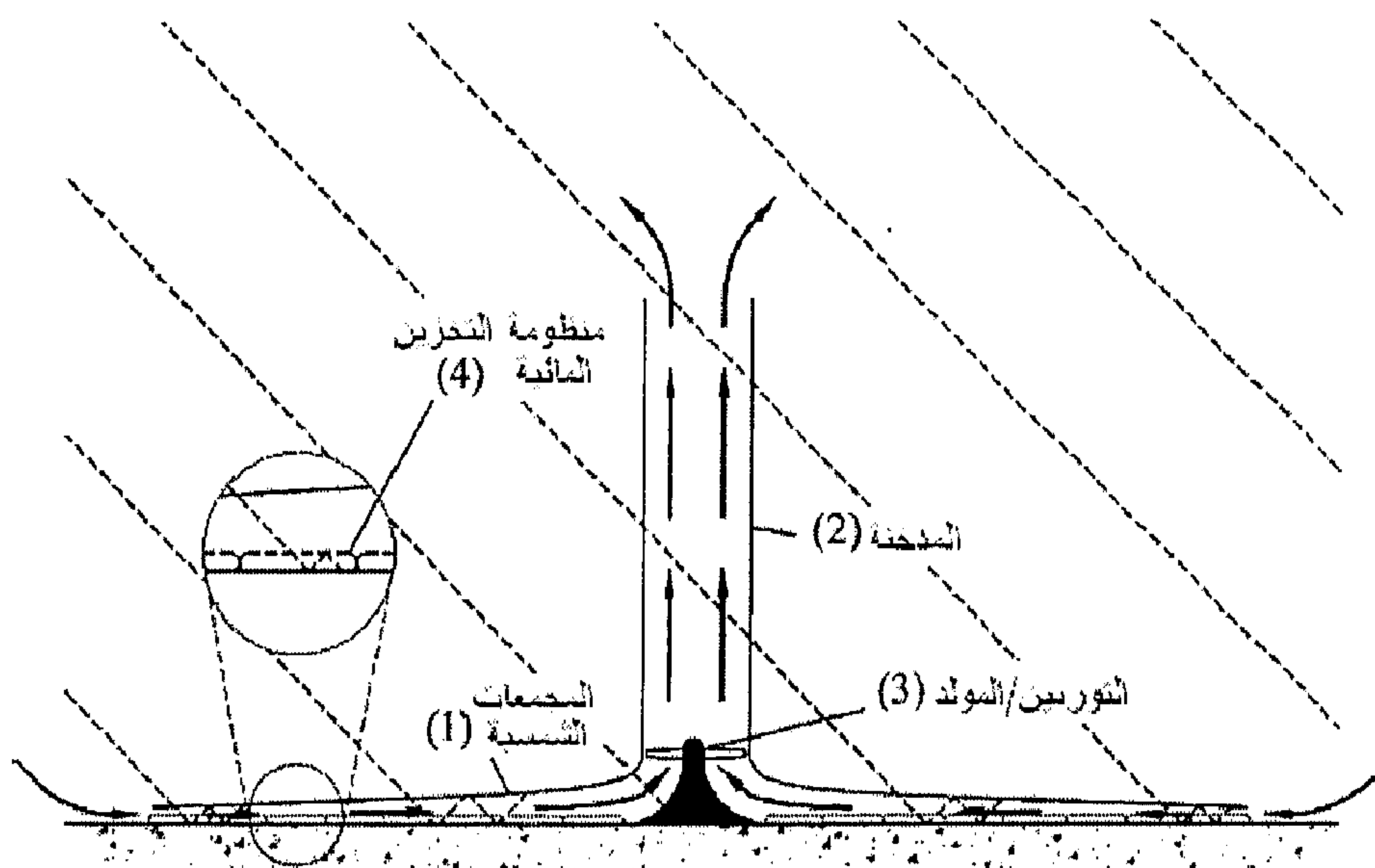
جدول (5.9) مواصفات المحطات البرجية التجريبية حول العالم

الشركة المنفذة	البلد	الطاقة المنتجة (MW_e)	مائع انتقال الحرارة	وسط التخزين	تاريخ بدأ التشغيل
SSP-5	أسبانيا	0.5	الصوديوم السائل	الصوديوم	1981
TSA	أسبانيا	1	الهواء	السيراميك	1993
CESA-1	أسبانيا	1	بخار الماء	ملح النترات	1983
EURELIOS	إيطاليا	1	بخار الماء	ملح النترات/ الماء	1981
SUNSHINE	اليابان	1	بخار الماء	ملح النترات/ الماء	1981
Solar One	أمريكيا	10	بخار الماء	زيت/ صخور	1982
MSEECat B	أمريكيا	1	ملح النترات المنصهر	ملح النترات	1984
Solar Two	أمريكيا	10	ملح النترات المنصهر	ملح النترات	1996
THEMIS	فرنسا	2.5	الملح	الملح	1984
SSP-5	روسيا	5	بخار الماء	الماء/ البخار	1986

4.9 المدخنة الشمسية

تعتبر المدخنة الشمسية إحدى وسائل توليد الطاقة، وذلك عن طريق استخدام الأشعة الشمسية لزيادة الطاقة الداخلية للهواء المار من خلال المنظومة. وبهذا فهي منظومة تحول الطاقة الشمسية إلى طاقة حركية، تحول بعدها طاقة الحركة للهواء إلى طاقة كهربائية باستخدام توربين مناسب. تتكون المدخنة الشمسية من ثلاثة أجزاء رئيسية؛ (1) المجمعات الشمسية أو البيت الزجاجي، (2) المدخنة، (3) التوربين، كما هو مبين في الشكل (21.9). تثبت المجمعات الشمسية على بعد بضع أمتار عن سطح الأرض، وتغطى بزجاج شفاف. الهدف الرئيس هو تجميع الأشعة الشمسية لتسخين الهواء بداخل البيت الزجاجي. قوى الطفو تقود الهواء الساخن إلى المدخنة، والتي تقع في منتصف المجمعات الشمسية. يوضع توربين في طريق سريان الهواء لتحويل طاقة الحركة للهواء إلى طاقة كهربائية.

لاستمرار الإنتاج الكهربائي ليلاً يمكن أن تتضمن المجمعات الشمسية نظام تخزين مائي (4)، كما في الشكل (21.9).



شكل (21.9) رسم توضيحي للمدخنة الشمسية

اقترحت المدخنة من قبل الأستاذ الألماني J.Schlaich من جامعة Stuttgrat بألمانيا في عام 1968، حيث أشارت الدراسة إلى أن كلفة الإنشاء لمحطات كبيرة القدرة تبلغ حوالي 250 $/kW، وكلفة التشغيل ستكون الأقل على الإطلاق وحوالي 0.02 $/kW ÷ 0.01. في عام 1981 بدأ إنشاء محطة تجريبية بقدرة 50 kW في مدينة Manzanares بأسبانيا، والتي أنتجت الطاقة الكهربائية لمدة ثمان سنوات، وبالتالي أثبتت نجاح واعتمادية هذه التقنية الجديدة. بلغ ارتفاع المدخنة 194.6 m وبقطر ثابت حوالي 10.3 m، ونصف قطر دائرة المجمعات الشمسية 122 m، ويختلف بعدها عن سطح الأرض من 2 m عند البداية إلى 6 m عند قاعدة

المدخنة. ووصلت سرعة الهواء داخل المدخنة 15 m/s تحت ظروف اللاحمل. وكانت كلفة تشغيل المدخنة أقل ما يمكن. إن التحقيقات الأساسية للمنظومة الأسبانية أُدرجت في (Haaf, et al., 1983)، وتطرق البحث إلى مناقشة مختصرة لاتزان الطاقة، الخواص التصميمية، وتحليل الكلفة. في دراسة تالية (Haaf, 1984)، قدم نتائج الاختبار التمهيدي لبناء المحطة في أسبانيا. (Castillo, 1984) أقترح هيكلية جديدة لبناء المدخنة الشمسية. تواصلت بعدها الأبحاث لتطبيق المدخنة الشمسية للأحجام المتوسطة والكبيرة لإنتاج الطاقة الكهربائية، وقد درس (Schlaich, et al., 1990) الانتقال من مرحلة التجارب إلى نموذجي تطبيقي في مدينة Manzanares يشمل محطات طاقة كبيرة (5, 30, 100 MW)، أدرج (Yan, et al., 1991) نموذجاً رياضياً أكثر شمولية يتم من خلاله استخدام علاقات تجريبية لاستخلاص معادلات لمعدل سريان الهواء، سرعة الهواء، الطاقة الخارجة، وكفاءة التحويل الحراري ـ الكهربائي.

وتعتبر المناطق الصحراوية الصخرية من أفضل الأماكن المناسبة لإنشاء مثل هذه المنظومات الشمسية، والتي تكون فيها شدة الإشعاع الشمسي تتراوح ما بين $500-600\ \mathrm{W/m^2}$. وبالتالي فإن مناطق مثل جنوب أوروبا وشمال أفريقيا تكون مثالية لإنشاء محطات المدخنة الشمسية، حيث تكون أدنى قيمة لشدة الإشعاع الشمسي حوالي $500\ \mathrm{W/m^2}$ وعدد ساعات الشروق تزيد عن 300 يوم مشمس في السنة، (Kut, Hare, 1983).

1.4.9 التحليل الرياضي

الطاقة المتحصل عليها من المدخنة الشمسية تعتمد على عدة متغيرات مثل الظروف المحيطة (شدة الإشعاع الشمسي، درجة حرارة الهواء الجوي، وسرعة

الرياح) وأبعاد المدخنة والمجمعات الشمسية. ويستند التحليل المذكور أدناه على الفرضيات البسيطة التالية:

- سريان هواء متماثل على طول محور التماثل في المجمعات الشمسية، بمعنى أن التسخين الغير منتظم لسطح المجمعات الشمسية بسبب تغير زاوية سمت الشمس، مهمل.
- المجمعات الشمسية موضوعة على سطح مستو.
- يعتبر السريان في المجمعات الشمسية بين سطحين متوازيين.
- فواقد الحرارة من خلال جدار المدخنة مهمل.
- سريان الهواء الرطب يعتبر كخليط من غازين مثاليين.

2.4.9 الشبكة الحرارية

مجمعات المدخنة الشمسية هي عبارة عن مسخنات هواء شمسية، والتي تتكون من مصفوفة من المجمعات الشمسية المترابطة مع بعضها. بتطبيق معادلة الزخم خلال مقطع تفاضلي من المجمع الشمسي نحصل على:

$$\frac{\partial (m\,u)}{\partial t} = -\dot{m}\,u_2 + \dot{m}\,u_1 + p_1\,A_1 - p_2\,A_2 - 2\,\pi\,r\,r_c\,\tau \qquad (38.9)$$

حيث τ تمثل إجهاد القص الواقع على الهواء الملاصق بسطح المجمعات الشمسية، r_c – نصف قطر دائرة المجمعات الشمسية، r – نصف قطر المدخنة، p_2, p_1 – الضغط عند بداية ونهاية المجمع الشمسي، A_2, A_1 – مساحة مقطع ممر الهواء عند بداية ونهاية المجمع، u_2, u_1 – سرعة تيار الهواء عند بداية ونهاية المجمع، $\dot{m}$ – معدل تدفق الهواء من خلال المجمع، كما هو موضح في الشكل (22.9).

يستخدم نوعان من المجمعات الشمسية في المدخنة الشمسية:

(1) أحادي القناة، يمر الهواء بين الزجاج العلوي والصفيحة الماصة السفلية.

(2) ثنائي القناة، يمر الهواء في هذا التصميم بين الصفيحة الماصة والصفيحة السفلية.

كلا النوعين يمكن تزويدها بمنظومة تخزين حرارية مائي، وذلك في القناة حيث يمر الهواء على الأرض، كما هو مبين في الشكل (21.9). للنوع الثاني، إن معادلات الاتزان الحراري التالي تم الحصول عليها من الشبكة الحرارية عند النقاط المبينة في الشكل (23.9):

$$T_1: \quad S_1 + h_{r21}\left(T_2 - T_1\right) + h_1\left(T_{f1} - T_1\right) = h_w\left(T_1 - T_\infty\right) + h_{rs}\left(T_1 - T_s\right) \quad (39.9)$$

$$T_{f1}: \quad h_1\left(T_1 - T_{f1}\right) = h_2\left(T_{f1} - T_2\right) \quad (40.9)$$

$$T_2: \quad S_2 + h_2\left(T_{f1} - T_2\right) = h_3\left(T_2 - T_{f2}\right) + h_{r32}\left(T_2 - T_3\right) + h_{r21}\left(T_2 - T_1\right) \quad (41.9)$$

$$T_{f2}: \quad h_3\left(T_2 - T_{f2}\right) = h_4\left(T_{f2} - T_3\right) + q \quad (42.9)$$

$$T_3: \quad S_3 = h_4\left(T_3 - T_{f2}\right) + h_{r32}\left(T_3 - T_2\right) + h_5\left(T_3 - T_{f3}\right) + h_{r43}\left(T_4 - T_3\right) \quad (43.9)$$

$$T_{f3}: \quad h_5\left(T_3 - T_{f3}\right) = h_6\left(T_{f3} - T_4\right) \quad (44.9)$$

$$T_4: \quad S_4 = h_6\left(T_4 - T_{f3}\right) + h_{r43}\left(T_4 - T_3\right) + h_7\left(T_4 - T_{f4}\right) + U_w\left(T_4 - T_{4,0}\right) \quad (45.9)$$

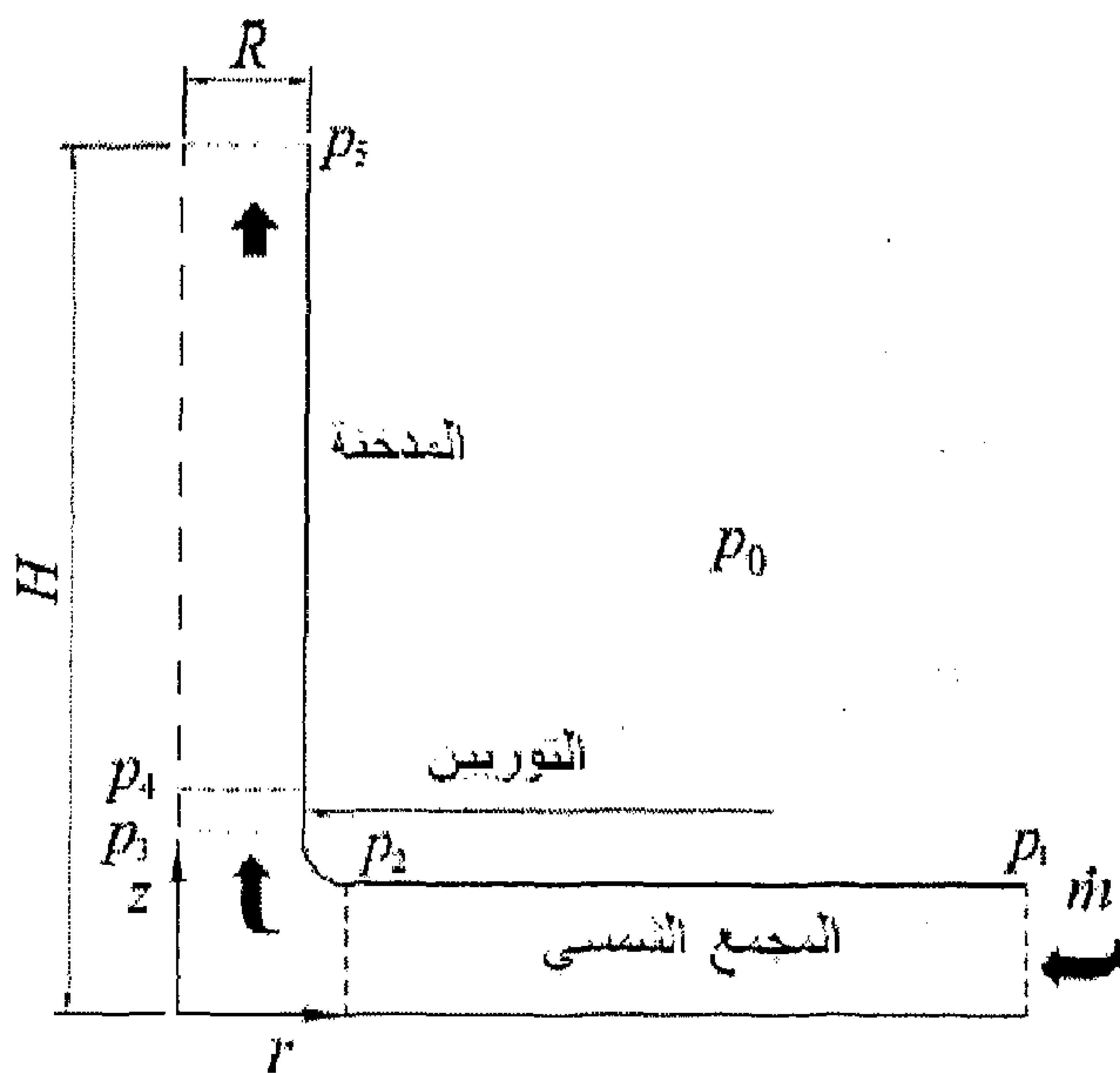
$$T_{f4}: \quad h_7\left(T_7 - T_{f4}\right) = h_8\left(T_{f4} - T_5\right) \quad (46.9)$$

$$T_5: \quad h_8\left(T_{f4} - T_5\right) = U_b\left(T_5 - T_{5,0}\right) \quad (47.9)$$

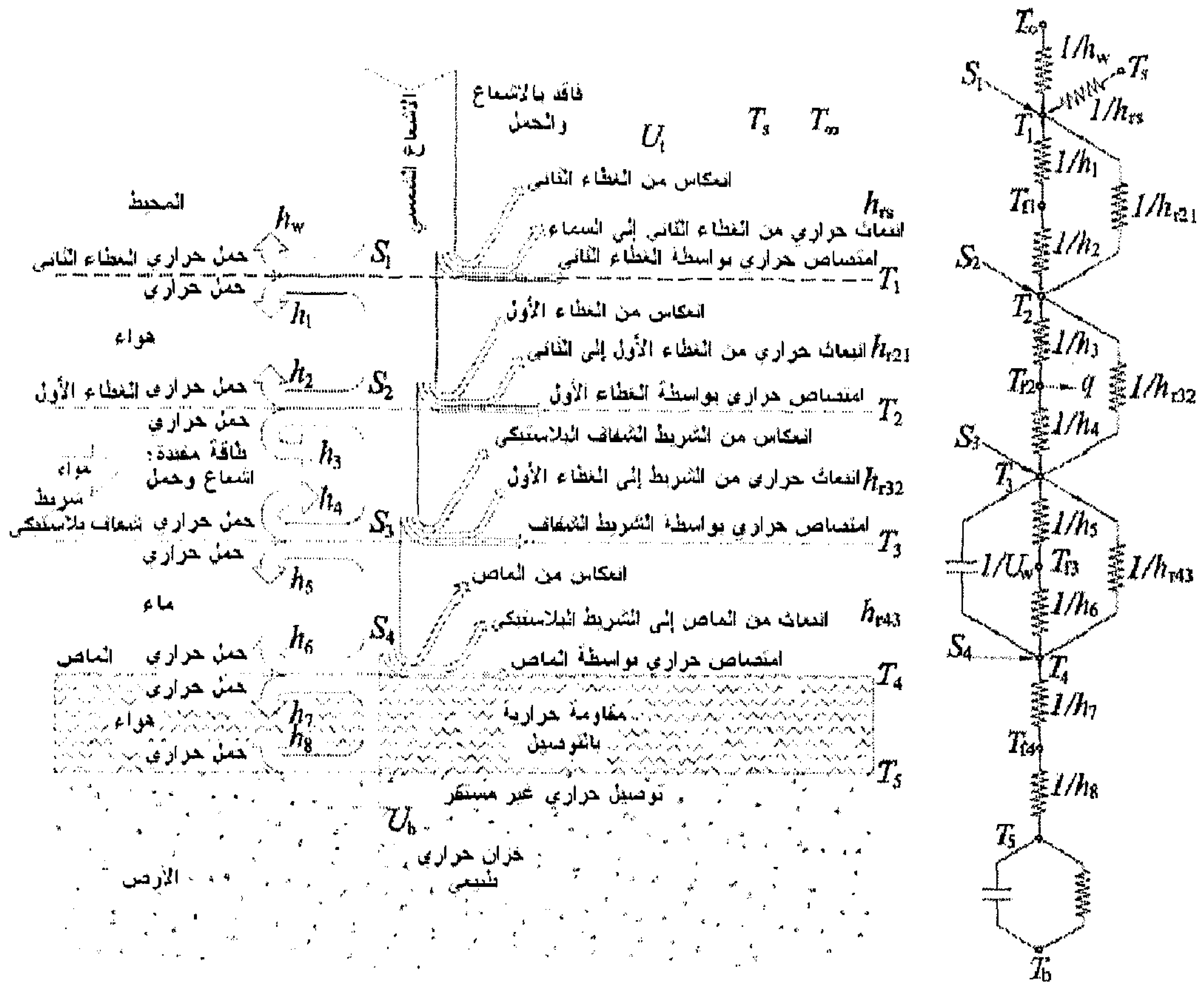
حيث: h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, h_8، معاملات انتقال الحرارة بالحمل، للغطاء الثاني، وللغطاء الأول، من الغطاء الأول إلى تيار الهواء، من شريط البلاستيك الشفاف إلى تيار الهواء، من شريط البلاستيك الشفاف إلى الماء، من الصفيحة الماصة إلى الماء، من الصفيحة الماصة إلى الهواء، من سطح الأرض إلى الهواء، على

التوالي. h_{r21}، h_{r32}، h_{r43}، معاملات انتقال الحرارة بالإشعاع، بين الغطاء الثاني والأول، بين الغطاء الأول وشريط البلاستيك الشفاف، بين شريط البلاستيك الشفاف والصفيحة الماصة، على التوالي. T_1، T_2، T_3، T_4، T_5، T_b، تمثل درجات الحرارة عند الغطاء الثاني، الغطاء الأول، شريط البلاستيك الشفاف، الصفيحة الماصة، سطح الأرض و درجة حرارة الأرض، على التوالي.

T_{f1}، T_{f2}، T_{f3}، T_{f4}، تمثل درجة حرارة الهواء بين الغطاء الثاني والأول، متوسط درجة حرارة الهواء، درجة حرارة الماء، ودرجة حرارة الهواء بين الصفيحة الماصة وسطح الأرض، على التوالي. U_b، U_t، U_w، تمثل معامل انتقال الحرارة عند الأرض، معامل الفقد الحراري العلوي، ومعامل انتقال الحرارة في منظومة الخزن المائي، على التوالي.



شكل (22.9) مخطط لسريان الهواء في المدخنة



شكل (23.9) الشبكة الحرارية للمجمعات الشمسية في المدخنة الشمسية

بفرض أن درجة حرارة الهواء تتغير خطياً على طول كل جزء من المجمعات الشمسية، فان درجة الحرارة المتوسطة يمكن تمثيلها بالمتوسط الجبري كالتالي:

$$T_f = \frac{T_{f,i} + T_{f,o}}{2} \quad (48.9)$$

الطاقة المفيدة المنتقلة إلى تيار الهواء المتحرك يمكن أن تُصاغ بدلالة درجات حرارة دخول ودرجة الحرارة المتوسطة للمائع، كالتالي:

$$q = \Gamma \left(T_f - T_{f,i}\right) \quad (49.9)$$

$$\Gamma = \frac{\dot{m}\ cp}{\pi\ r\ L} \quad (50.9)$$

بتعويض المعادلة (49.9) في المعادلة (41.9) وبإعادة الترتيب نحصل على:

- مصفوفة 9×9 للنوع الثاني من المجمعات الشمسية مع خزان مائي، (50.9).
- مصفوفة 7×7 للنوع الأول من المجمعات الشمسية مع خزان مائي، (51.9).
- مصفوفة 7×7 للنوع الثاني من المجمعات الشمسية بدون خزان مائي، (52.9).
- مصفوفة 5×5 للنوع الأول من المجمعات الشمسية بدون خزان مائي، (53.9).

$$\begin{bmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ +h_{r21} \\ +U_t \end{pmatrix} & -h_1 & -h_{r21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & -\begin{pmatrix} h_1 \\ +h_2 \end{pmatrix} & h_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -h_{r21} & -h_2 & \begin{pmatrix} h_2 \\ +h_3 \\ +h_{r21} \\ +h_{r32} \end{pmatrix} & -h_3 & -h_{r32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_3 & -\begin{pmatrix} h_3 \\ +h_4 \\ +F \end{pmatrix} & h_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -h_{r32} & -h_4 & \begin{pmatrix} h_4 \\ +h_{r32} \\ +h_{r43} \\ +h_5 \end{pmatrix} & -h_5 & -h_{r43} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_5 & -\begin{pmatrix} h_5 \\ +h_6 \end{pmatrix} & h_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -h_{r43} & -h_6 & \begin{pmatrix} h_6 \\ +h_{r43} \\ +h_7 \\ +U_w \end{pmatrix} & -h_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_7 & -\begin{pmatrix} h_7 \\ +h_8 \end{pmatrix} & h_8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -h_8 & \begin{pmatrix} h_8 \\ +U_b \end{pmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_{f1} \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \\ T_{f3} \\ T_4 \\ T_{f4} \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 + h_w T_\infty + h_{rs} T_s \\ 0 \\ S_2 \\ -F T_{f2,i} \\ S_3 \\ 0 \\ S_4 + U_w T_{4,0} \\ 0 \\ U_b T_{5,0} \end{bmatrix} \quad (51.9)$$

$$\begin{bmatrix} \begin{pmatrix} h_3 \\ +h_{r21} \\ +U_t \end{pmatrix} & -h_3 & -h_{r32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_3 & -\begin{pmatrix} h_3 \\ +h_4 \\ +F \end{pmatrix} & h_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -h_{r32} & -h_4 & \begin{pmatrix} h_4 \\ +h_{r32} \\ +h_{r43} \\ +h_5 \end{pmatrix} & -h_5 & -h_{r43} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_5 & -\begin{pmatrix} h_5 \\ +h_6 \end{pmatrix} & h_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -h_{r43} & -h_6 & \begin{pmatrix} h_6 \\ +h_{r43} \\ +h_7 \\ +U_w \end{pmatrix} & -h_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_7 & -\begin{pmatrix} h_7 \\ +h_8 \end{pmatrix} & h_8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & & -h_8 & \begin{pmatrix} h_8 \\ +U_b \end{pmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_2 \\ T_{f2} \\ T_3 \\ T_{f3} \\ T_4 \\ T_{f4} \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_2 + h_w T_\infty + h_{rs} T_s \\ -F T_{f2,i} \\ S_3 \\ 0 \\ S_4 + U_w T_{4,0} \\ 0 \\ U_b T_{5,0} \end{bmatrix} \quad (52.9)$$

$$\begin{bmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ +h_{r21} \\ +U_t \end{pmatrix} & -h_1 & -h_{r21} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & -\begin{pmatrix} h_1 \\ +h_2 \end{pmatrix} & h_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -h_{r21} & -h_2 & \begin{pmatrix} h_2 \\ +h_3 \\ +h_{r21} \\ +h_{r23} \end{pmatrix} & -h_3 & -h_{r32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_3 & -\begin{pmatrix} h_3 \\ +h_4 \\ +\Gamma \end{pmatrix} & h_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -h_{r32} & -h_4 & \begin{pmatrix} h_4 \\ +h_{r32} \\ +h_7 \end{pmatrix} & -h_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_7 & -\begin{pmatrix} h_7 \\ +h_8 \end{pmatrix} & h_8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -h_8 & \begin{pmatrix} h_8 \\ +U_b \end{pmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_{f1} \\ T_2 \\ T_{f2} \\ T_4 \\ T_{f4} \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 + h_w T_{sc} + h_{rs} T_s \\ 0 \\ S_2 \\ -\Gamma T_{f2,i} \\ S_3 \\ 0 U_b T_{5,0} \end{bmatrix} \quad (53.9)$$

$$\begin{bmatrix} (h_3 + h_{r32} + U_t) & -h_3 & -h_{r32} & 0 & 0 \\ h_3 & -(h_3 + h_4 + \Gamma) & h_4 & 0 & 0 \\ -h_{r32} & -h_4 & (h_4 + h_{r32} + h_7) & -h_7 & 0 \\ 0 & 0 & h_7 & -(h_7 + h_8) & h_8 \\ 0 & 0 & 0 & -h_8 & (h_8 + U_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_2 \\ T_{f2} \\ T_4 \\ T_{f4} \\ T_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_2 + h_w T_{sc} + h_{rs} T_s \\ -\Gamma T_{f2,i} \\ S_3 \\ 0 \\ U_b T_{5,0} \end{bmatrix} \quad (54.9)$$

وبصورة عامة، فإنه يمكن كتابة المصفوفات أعلاه على الصورة التالية:

$$[A][T]=[B] \quad (55.9)$$

متجه درجة الحرارة المتوسطة يمكن تحديده بواسطة معكوس المصفوفة:

$$[T]=[A]^{-1}[B] \quad (56.9)$$

3.4.9 معاملات انتقال الحرارة

يمكن الحصول على معامل انتقال الحرارة العلوي الكلي من:

$$U_t = (h_w + h_{rs}) \quad (57.9)$$

حيث:

$$h_w = \frac{k}{L} Nu \quad (58.9)$$

وكذلك:

$$h_{rs} = \frac{\sigma\,\varepsilon\left(T_1^4 - T_s^4\right)}{\left(T_1 - T_\infty\right)} \qquad (59.9)$$

درجة حرارة السماء الصافية T_s، نحصل عليها من (Berdahl, Martin, 1984) وهي معطاة بالعلاقة التالية:

$$T_s = T_\infty\left[0.711 + 0.0056\left(T_{db} - 273.15\right) + 73\times10^{-6}\left(T_{db} - 273.15\right)^2 + 0.013\cos(15t)\right]^{1/4} \qquad (60.9)$$

حيث t، الزمن من منتصف الليل.

معامل انتقال الحرارة إلى الأرض يُعطى بالعلاقة التالية:

$$U_b = \frac{2b}{\sqrt{\pi t}} \qquad (61.9)$$

حيث:

$$b = \sqrt{k\,\rho\,cp} \qquad (62.9)$$

معاملات انتقال الحرارة بالإشعاع بين لوحين متوازيين لكل من 1-2، 2-3، 3-4 تعطى بالعلاقة التالية:

$$h_{r21} = \frac{\sigma\left(T_1^2 + T_2^2\right)\left(T_1 + T_2\right)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \qquad (63.9)$$

$$h_{r32} = \frac{\sigma\left(T_2^2 + T_3^2\right)\left(T_2 + T_3\right)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1\right)} \qquad (64.9)$$

$$h_{r34} = \frac{\sigma\left(T_3^2 + T_4^2\right)\left(T_3 + T_4\right)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_3} + \frac{1}{\varepsilon_4} - 1\right)} \qquad (65.9)$$

الفيوض الإشعاعية الشمسية المتصة من قبل الأسطح المختلفة في المجمع تُعطى بالعلاقات التالية:

$$S_1 = \alpha_1 H \qquad (66.9)$$

$$S_2 = \tau_1 \alpha_2 H \qquad (67.9)$$

$$S_3 = \tau_2 \alpha_3 H \qquad (68.9)$$

$$S_4 = \tau_3 \alpha_4 H \qquad (69.9)$$

حيث: S_1 ، S_2 ، S_3 ، S_4 ، تمثل الأشعة الشمسية المتصة من قبل الغطاء الثاني، الغطاء الأول، الشريط البلاستيكي الشفاف، والصفيحة الماصة، على التوالي.

الخاصيتان النفاذية والامتصاصية لغطاء مفرد تُعطى:

$$\tau \cong \tau_a \, \tau_r \qquad (70.9)$$

$$\alpha \cong 1 - \tau_a \qquad (71.9)$$

أدرج في الجدول (6.9) قائمة بالعلاقات المستعملة لحساب معاملات انتقال الحرارة بالحمل القسري $(h_8 \cdots h_1)$، والحمل الحر (h_w). الرموز السفلية (x , m,turb , m,lam) تمثل رقم ناسلت الطبائقي المتوسط، المضطرب المتوسط، ورقم ناسلت الموضعي.

4.4.9 فاقد الاحتكاك في المجمع الشمسي

يبين الجدول (7.9) عوامل الاحتكاك المستعملة لحساب إجهاد القص في المجمع.

جدول (6.9) العلاقات المستخدمة لإيجاد معاملات انتقال الحرارة بالحمل القسري والطبيعي (صفيحة مستوية، درجة حرارة ثابتة)

المعادلات	نظام السريان/المصدر
الحمل القسري	
$Nu_m = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\sqrt{Re_x}\frac{Pr}{\left(1+1.7Pr^{1/4}+21.36Pr\right)^{1/6}}$	جريان طباقي، $Re < 5\times10^5$، (Baehr, Stephan, 1996)
$Nu_{m,lam} = 2\,Nu_x$	
$Nu_m = \frac{0.037Re^{0.8}Pr}{1+1.7Re^{-0.1}\left(Pr^{2/3}-1\right)}$	$5\times10^5 < Re < 10^7$, $0.6 < Pr < 2000$ (Petukhov, Popov, 1999)
$Nu_m = \sqrt{Nu_{m,lam}^2 + Nu_{m,tur}^2}$	(Schlichting, et al., 1999)
الحمل الطبيعي (الحر)	
$Nu_m = 0.54\,Ra^{1/4}$	$10^4 \le Ra < 10^7$، سطح أفقي ساخن من أعلى أو من أسفل، (Churchill, Chu, 1975)
$Nu_m = 0.14\,Ra^{1/3}$	$10^7 \le Ra \le 10^{11}$، سطح أفقي ساخن من أعلى أو من أسفل (Churchill, Chu, (1975)

جدول (7.9) العلاقات المستخدمة لإيجاد إجهاد القص في المجمع الشمسي (صفيحة مستوية)

المعادلات	نظام السريان/المصدر
$\frac{c_w}{2} = \frac{0.664}{\sqrt{Re_L}}$	طباقي، أملس، (Baehr, Stephan, 1996)
$\frac{c_w}{2} = \frac{0.0592}{Re_L^{1/5}}$	مضطرب، أملس، $10^5 \le Re_L \le 10^7$ (Baehr, Stephan, 1996)
$c_w = \frac{0.072}{Re_L^{1/5}} - \frac{1700}{Re_L}$	انتقالي، أملس، (Schlichting, et al., 1999)
$c_w = \left[1.89 - 1.62\log\left(\frac{k_r}{L}\right)\right]^{-2.5}$	مضطرب، خشن، $10^{-6} \le k_r/L \le 10^{-2}$، (Schlichting, et al., 1999)

5.4.9 المدخنة

وظيفة المدخنة هو تحويل الطاقة الحرارية للهواء المنتجة بواسطة المجمعات الشمسية إلى طاقة حركية. ارتفاع درجات حرارة الهواء في المجمعات الشمسية يسبب اختلاف في الكثافة والذي يعمل كقوة تحريك للهواء. وللتبسيط فانه يمكن إهمال انتقال الحرارة خلال مساحة مقطع المدخنة. بتطبيق معادلة الزخم على مقاطع تفاضلية من المدخنة، نحصل على:

$$\frac{d\,\rho w^2}{d\,z} = \frac{d\,p}{d\,z} - (\rho - \rho_0)\,g \qquad (72.9)$$

وبهذا، فان السرعة يمكن صياغتها على الصورة التالية:

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho}\left[\int_0^{H_k} (\rho - \rho_0)\,g\,d\,z - \Delta\,p_{friction}\right]} \qquad (73.9)$$

خارج المدخنة، يحسب تغير الضغط، درجة الحرارة، والكثافة للهواء الجوي العادي من العلاقات التالية:

$$T_\infty(z) = T_\infty(0)\left(1 - \frac{k-1}{k}\frac{z}{H_0}\right) \qquad (74.9)$$

$$p_\infty(z) = p_\infty(0)\left(1 + \frac{k-1}{k}\frac{z}{H_0}\right)^{k/(k-1)} \qquad (75.9)$$

$$\rho_\infty(z) = \rho_\infty(0)\left(1 + \frac{k-1}{k}\frac{z}{H_0}\right)^{1/(k-1)} \qquad (76.9)$$

حيث:

$$H_0 = \frac{R_1 T_\infty(0)}{g} \qquad (77.9)$$

للهواء الجوي الاعتيادي $k = 1.235$.

داخل المدخنة، يحسب تغير الضغط، درجة الحرارة، والكثافة للهواء الجوي العادي من العلاقات التالية:

$$T_t(z) = T_{t,in}(0)\left(1 - \frac{k-1}{k}\frac{z}{H_0}\right) \qquad (78.9)$$

$$p_t(z) = p_t(0)\left(1 + \frac{k-1}{k}\frac{z}{H_0}\right)^{k/(k-1)} \qquad (79.9)$$

$$\rho_t(z) = \rho_t(0)\left(1 + \frac{k-1}{k}\frac{z}{H_0}\right)^{1/(k-1)} \qquad (80.9)$$

حيث:

$$H_0 = \frac{R_1 T_{t,in}(0)}{g} \qquad (81.9)$$

$$k = 1.4005$$

6.4.9 فاقد الاحتكاك في المدخنة

يبين الجدول (8.9) العلاقات المستعملة لإيجاد معاملات الاحتكاك لحساب إجهاد القص في المدخنة.

جدول (8.9) العلاقات المستخدمة لايجاد اجهاد القص في المدخنة (أنبوب، أملس)

المعادلات	نظام السريان/المصدر
$f = \frac{16}{\text{Re}}$	طباقي، كامل النمو $\text{Re} \leq 2100$، (Baehr, Stephan, 1996)
$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.5635 \ln\left(\frac{\text{Re}}{7}\right)$	مضطرب، كامل النمو ، $4000 < \text{Re} < 10^7$، (Colebrook, 1939)
$\frac{2}{f} = \left\{ \frac{1}{\left[(8/\text{Re})^{10} + (\text{Re}/36500)^{20}\right]^{1/2}} + \left[2.21 \ln\left(\frac{\text{Re}}{7}\right)\right]^{10} \right\}^{1/5}$	مضطرب، خشن، $10^{-6} \leq k_r/L \leq 10^{-2}$، (Schlichting, et al., 1999)

7.4.9 التوربين والمولد

في المدخنة يتحول الفيض الحراري المنتج بواسطة المجمع الشمسي إلى طاقة حركية (تيار حمل) وإلى طاقة وضع (تخلخل في الضغط عند التوربين). ويسبب إرتفاع درجة حرارة الهواء في المجمعات الشمسية في حدوث فرق في كثافة الهواء وهذا بدوره يؤدي إلى توليد قوى حركية. وعمود الهواء الأخف في المدخنة مرتبط مع الهواء الجوي المحيط عند القاعدة (داخل المجمعات الشمسية) وعند قمة المدخنة، وبهذا يصعد الهواء مرتفعاً داخل المدخنة. ويزيد فرق الضغط بين قاعدة المدخنة (مخرج المجمعات الشمسية) والمحيط الخارجي Δp_{tot}. ويمكن صياغة تخلخل الضغط خلال التوربين كدالة في فرق الضغط الكلي:

$$\Delta p_{turb} = \Delta p_{tot} - \frac{1}{2} \rho w^2 \qquad (82.9)$$

حيث:

$$\Delta p_{tot} = \int_{0}^{H_k} (\rho_0 - \rho) g \, dz \qquad (83.9)$$

سرعة الهواء عند فوهة المدخنة يمكن الحصول عليها باستعمال العلاقة التالية:

$$w = w_{tot} \sqrt{1-x} \qquad (84.9)$$

حيث: x، معامل تخلخل الضغط عند التوربين، w_{tot}، السرعة المتحصل عليها بإهمال فواقد الاحتكاك.

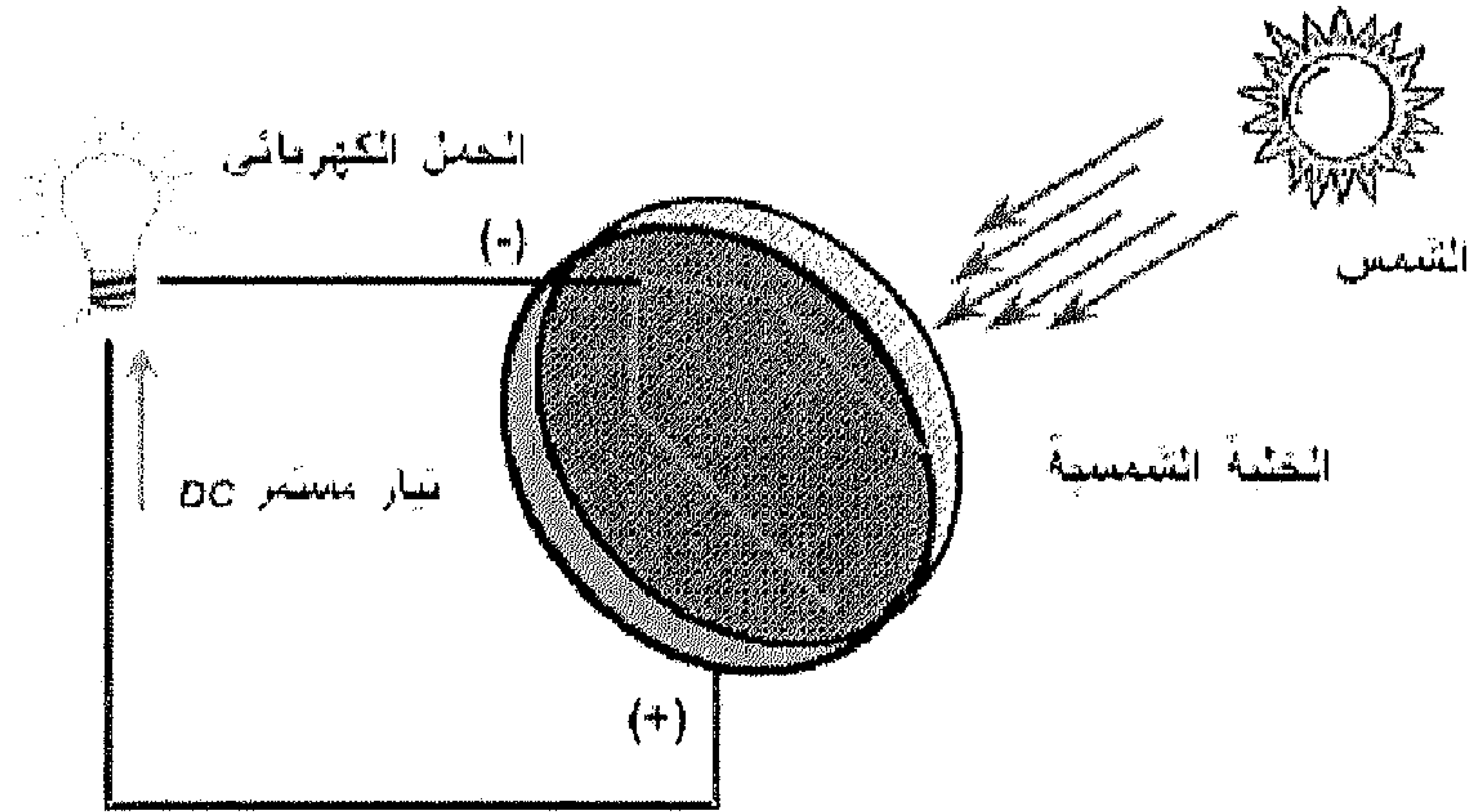
القيمة النظرية للقدرة المفيدة المأخوذة من التوربين هي:

$$P = \Delta p_{tot} \, A \, w_{tot} \, \eta_t \, x \sqrt{1-x} \qquad (85.9)$$

5.9 الخلايا الشمسية

يمكن إنتاج الطاقة الكهربائية مباشرة عن طريق استخدام الخلايا الفوتوضوئية أو ما يعرف بالخلايا الشمسية، كما هو مبين في الشكل (24.9). الخلايا الشمسية هي نبائط الكترونية مصنوعة من مواد أشباه الموصلات التي لها القدرة على تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية على أساس النظرية الكمية في تحويل طاقة الفوتونات الضوئية إلى طاقة كهربائية. ولقد تمت ملاحظة ظاهرة التأثير الفوتوضوئي في سنة 1839، وتم تصنيع أول خلية شمسية من مادة أشباه الموصلات سنة 1950، بكفاءة تحويل وصلت إلى 6%. وأقتصر استخدام الخلايا الشمسية في بداياتها على توفير الطاقة الكهربائية للمركبات الفضائية. إلا أن الاهتمام بهذه التقنية الجديدة ازداد عالمياً بعد ما سمي بأزمة النفط في سنة 1973، وأتسع مجال استخداماتها لتشمل العديد من التطبيقات ومنها: الحماية المهبطية لأنابيب نقل النفط والغاز في قطاع النفط، في حفظ اللقحات والأمصال في المناطق النائية الصحراوية في مجال الطب، في ضخ المياه من الأبار، في المحطات السنتميترية

وإعادة البث في قطاع الاتصالات، وتجاوزت هذه التطبيقات الصغيرة لتصل إلى التطبيقات الكبيرة في إمداد المناطق النائية المعزولة عن الشبكة العامة للكهرباء، كما شملت وحدات توليد للكهرباء مربوطة مع الشبكة العامة، وغيرها من التطبيقات الأخرى.



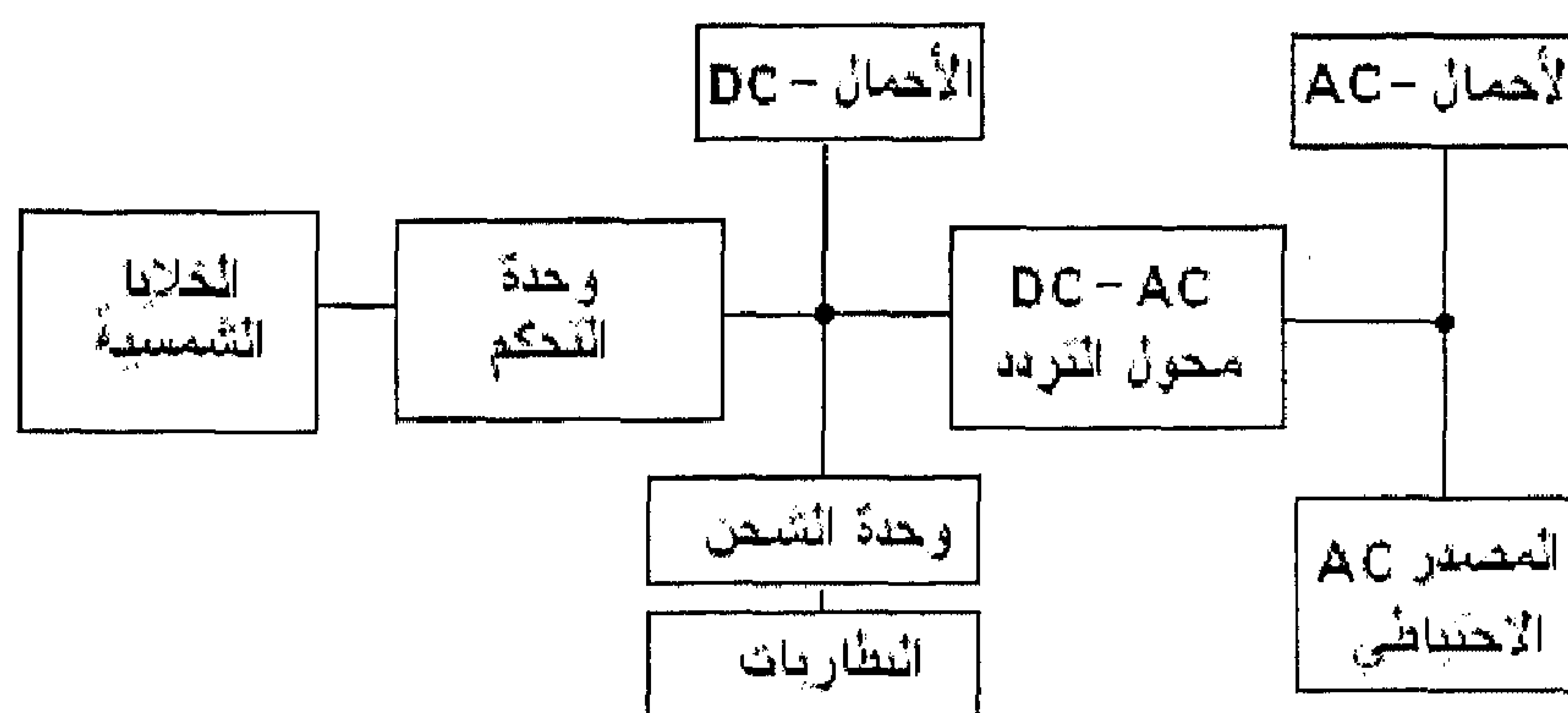
شكل (24.9) يوضح استقبال الخلية الشمسية للأشعة الشمسية وتحويلها مباشرة إلى تيار مستمر

إن الكلفة العالية للخلايا الشمسية حصرت استخدامها وجعلته يقتصر على تزويد المناطق النائية البعيدة عن الشبكة العامة للكهرباء وبقدرات صغيرة، إلا أن التطور الكبير في تقنيات إنتاج الخلايا الشمسية سوف يخفض من ثمنها ويجعلها من الطرق الواعدة لتوليد الطاقة الكهربائية. سنتعرض في هذا الجزء إلى هندسة منظومات التحويل الكهروضوئي ونترك النظرية الكمية ـ الفيزيائية إلى الكتب المتخصصة في ذلك.

1.5.9 مكونات منظومات الخلايا الشمسية

إن مساحة الخلية الشمسية الواحدة تعتبر صغيرة جداً بالنسبة للمساحة المعرضة للشمس على الأرض حيث تبلغ حوالي 0.06 متر مربع وكذلك الطاقة

التي تولدها الخلية الشمسية صغيرة جداً بالنسبة إلى احتياجاتنا للطاقة حيث تتراوح بين 0.5 إلى 0.6 فولت، الأمر الذي يستدعي استعمال عدد كبير من الخلايا الشمسية ترتب على شكل منظومة شمسية ويتم ربطها بالشكل الذي يؤمن فولتية وتيار الحمل المطلوب تغذيته، بالإضافة إلى سهولة نقلها. يتكون السطح الأمامي للمسطح الشمسي من زجاج ذي شفافية عالية. لتكون الخلايا الشمسية جاهزة للاستخدام، فيجب أن تضاف بعض الأجزاء الأخرى الضرورية، ومكونات المنظومات الشمسية مبينة في الشكل (25.9).



شكل (25.9) مكونات منظومة الخلايا الشمسية

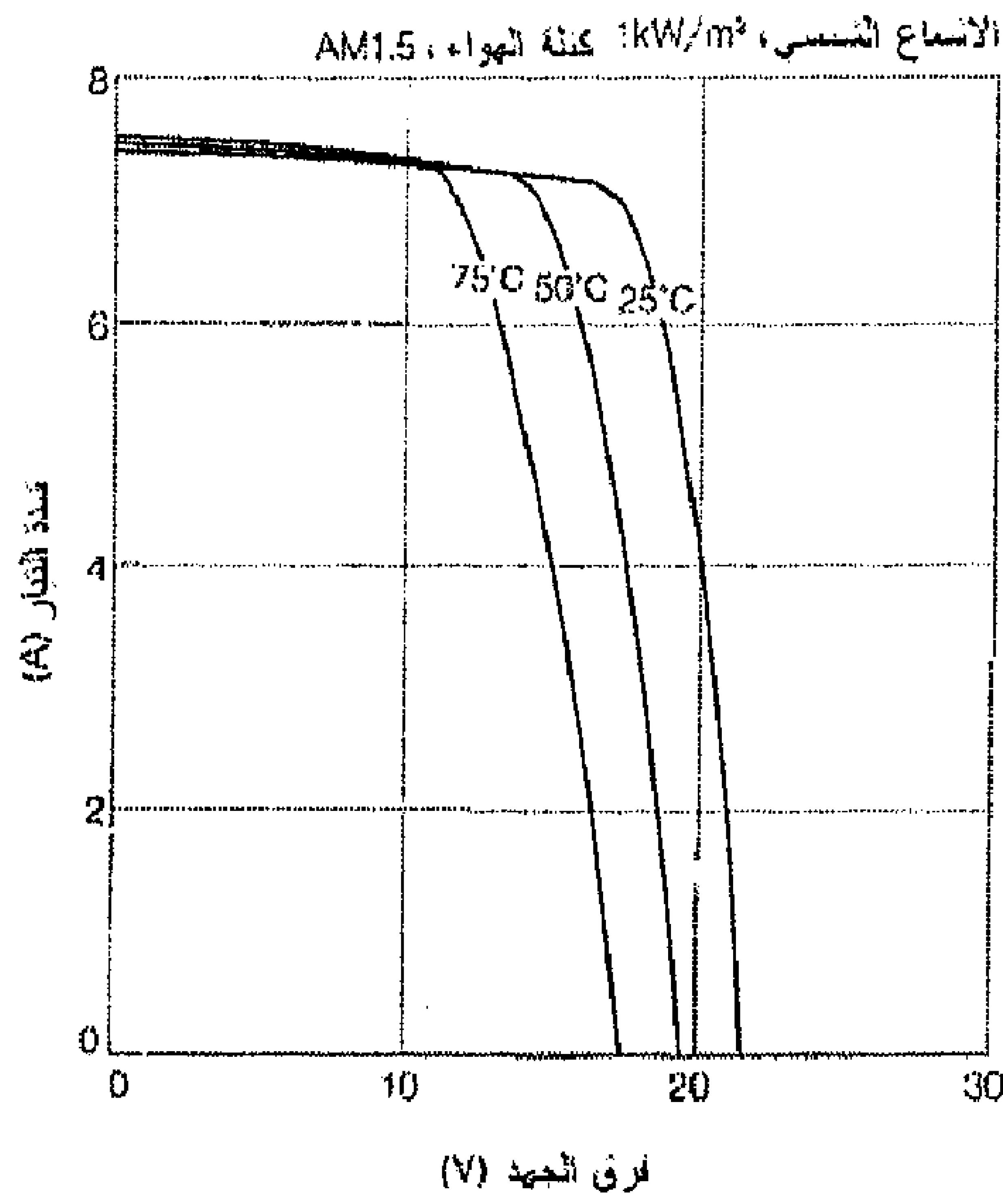
2.5.9 العوامل المؤثرة في أداء الخلية الشمسية

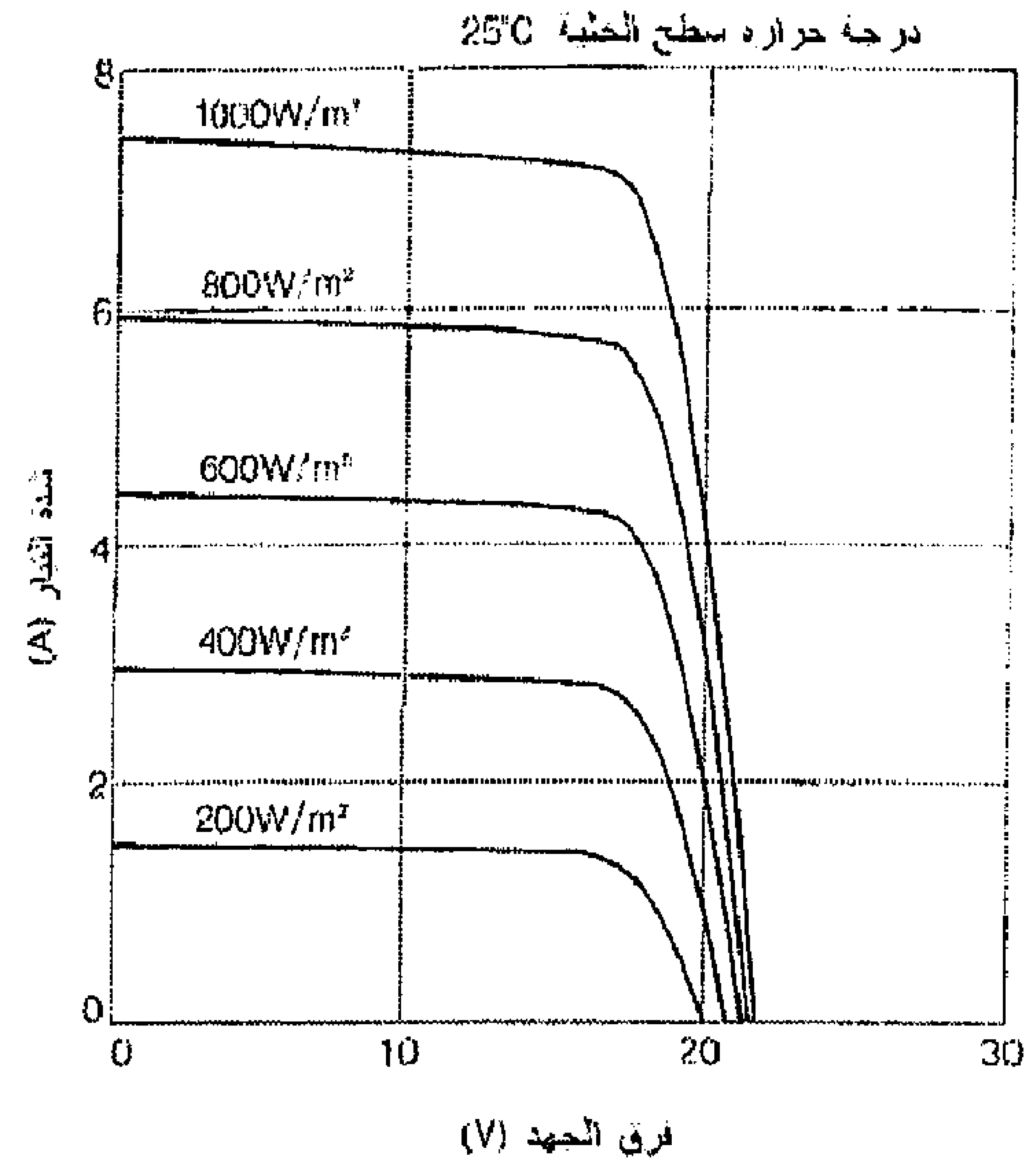
إن استجابة الخلية الشمسية تتغير بموجب عدة عوامل منها: شدة الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الخلية، درجة حرارة سطحها ومقدار الحمل المربوط عليها. من التجارب المعملية وجد أن الجهد يزداد قليلاً بزيادة الإشعاع الشمسي، أما التيار فإنه يتناسب تناسباً طردياً مع كثافة الإشعاع الشمسي والمحصلة تكون زيادة في قدرة الخرج الكهربائي للخلية. ولدرجة الحرارة تأثير مخالف، حيث

يتناسب فرق جهد الخلية تناسباً عكسياً مع درجة حرارة سطحها، بينما يزداد التيار زيادة طفيفة لذلك، وتكون المحصلة انخفاض قدرة الخلية الكهربائية، كما هو مبين في الشكل (26.9).

وكما هو واضح من الشكل (26.9)، فإن قدرة الخلية الشمسية تتأثر تأثيراً كبيراً بدرجة حرارة سطحها. والمسبب في ذلك هو شدة الإشعاع الشمسي والحمل. فالخلية الشمسية بحد ذاتها، تعمل وكأنها صفيحة سوداء ماصة للإشعاع الشمسي. ولذا فإنه عند تصميم المنظومات الكهربائية الشمسية يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار مقدار ما قد تصل إليه درجة حرارة سطح الخلية والتي تحت معظم ظروف التشغيل الحقيقية تكون أعلى من ظروف الاختبار القياسية STC والمذكورة في كتيب مواصفات الخلية (درجة حرارة سطح الخلية= 25°C، شدة الإشعاع الشمسي= $1000\,W/m^2$. ولذا كان من الضروري معرفة درجة حرارة سطح الخلايا الشمسية العاملة تحت الظروف الحقيقية للتشغيل والمناخ للمنطقة، لإجراء التصحيحات اللازمة (Zahedi, 2004) .

ليس بالسهولة تعيين درجة حرارة سطح الخلية بدقة وذلك لارتباطها بعدة عوامل: جوية، تشغيلية و تصنيعية. ولقد تمكن (Nassar, et al., 2001) من ربط هذه العوامل وصياغة معادلة رياضية لدرجة حرارة سطح الخلية الشمسية، إلا أنه غالباً ما تُعتمد العلاقات التجريبية والتي تربط درجة حرارة سطح الخلية مع كلٍ من درجة حرارة الجو وشدة الإشعاع الشمسي في الموقع المحدد، وأمكن الحصول على هذه المعادلة تجريبياً، ومثلت في الشكل (27.9)، والتي يمكن استخدامها لمنطقة الجنوب الليبي والتي كانت على الصورة التالية:

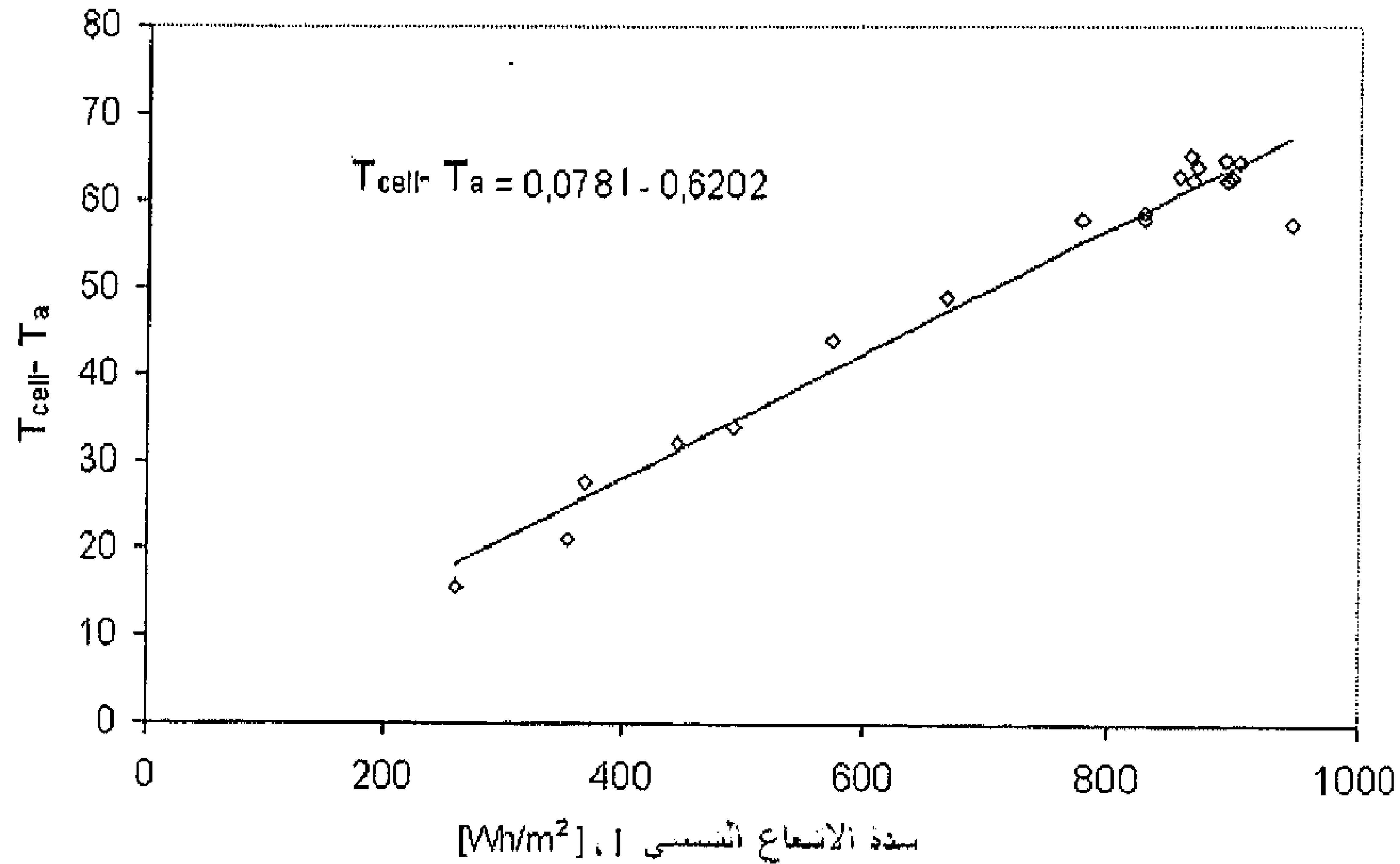




شكل (26.9) علاقة الخصائص الكهربائية ـ شدة التيار وفرق الجهد ـ مع شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة سطح الخلية، لخلية شمسية سيليكونية من نوع KC120-1

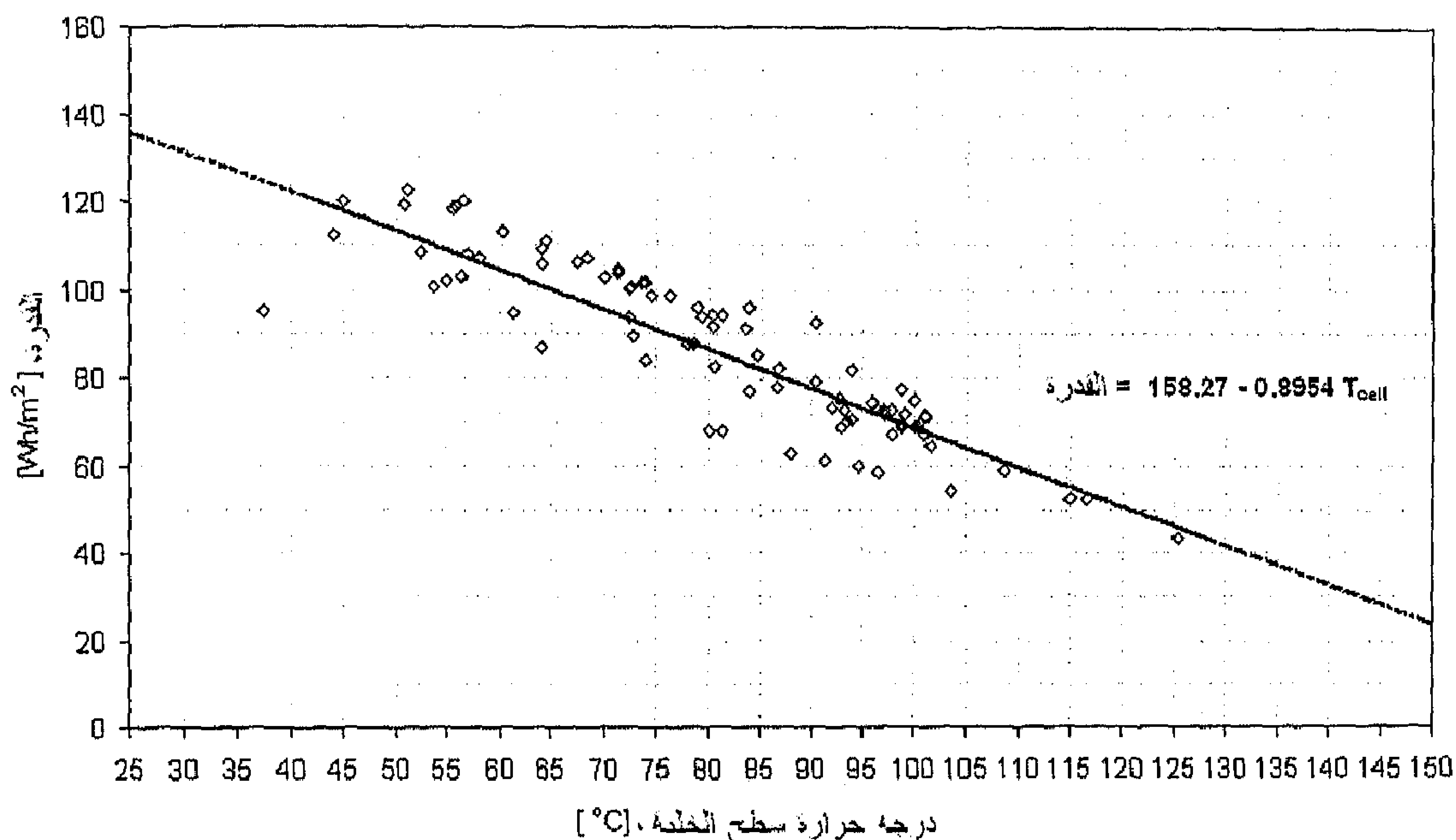
$$T_{cell} = T_a + 7.8 \times 10^{-2} H \qquad (85.9)$$

حيث: H هي شدة الإشعاع الشمسي W/m^2، T_a، درجة حرارة الجو، T_{cell}، تمثل درجة حرارة سطح الخلية الشمسية.



شكل (27.9) علاقة درجة حرارة سطح الخلية الشمسية مع شدة الإشعاع الشمسي الساقط عليها

الشكل (28.9) يبين علاقة قدرة الخلايا الشمسية مع درجة حرارة سطح الخلايا.



شكل (28.9) علاقة قدرة الخلايا الشمسية مع درجة حرارة سطحها

وكما هو واضح من الشكل (28.9) فإن لدرجة حرارة سطح الخلية أثـر كـبير على فعاليتها واعتماديتها. ولما كانت الخلايا الشمسية تعمل في ظروف مخالفة لتلك الظروف القياسية فإنه من الضروري الأخذ بعين الاعتبار تأثير درجة حرارة سـطح الخلايا الشمسية على خصائص الخلايا الشمسـية، وأخـص بالـذكر، فـرق الجهـد، القدرة، والكفاءة. يمكن صياغة معادلة عامة لتحديد خصائص الخرج الكهربائي من الخلايا الشمسية، وهي كما أوردها نصّار وآخرون (Nassar et al., 2004):

$$X = X_{STC} + \beta_X \left(T_{cell} - T_{STC}\right) \qquad (86.9)$$

حيث يمثل المتغير X أي خاصية كهربائيـة فـرق الجهـد، شـدة التيـار، الكفـاءة أو القدرة الكهربائية الخارجة من الخلية الشمسية،

X_{STC} هو قيمة الخاصية الكهربائية عند درجة حرارة وشدة إشعاع شمسي الاختبار الاعتيادية،

β_X هو معامل درجة الحرارة للخاصية الكهربائية بالوحدة الكهربائية لكل درجة حرارة، وهي تمثل معدل تغير الخاصية بتغير درجة الحرارة، dX/dT.

فتكون لفرق الجهد: β_V، معامل درجة حرارة لفرق الجهد، $Volt/^\circ C$.

وتكون لشدة التيار: β_I، معامل درجة حرارة لشدة التيار، $Amp/^\circ C$.

وتكون لفرق الجهد: β_η، معامل درجة حرارة للكفاءة، $\%/^\circ C$.

وتكون لفرق الجهد: β_p، معامل درجة حرارة للقدرة، $Watt/^\circ C$.

T_{cell} هي درجة حرارة سطح الخلية الشمسية، $^\circ C$.

T_{STC} هي درجة الحرارة القياسية لسطح الخلية الشمسية.

غالباً ما يدرج في كتيب المواصفات المرفق بالخلايا جميع هذه القيم لأهميتها القصوى في التصميم الصحيح للمنظومات الكهربائية الشمسية، كما هو مبين في الشكل (29.9)، حيث يمثل الشكل جزء من كتيب المواصفات الكهربائية لخلايا شمسية نوع SX150.

فعلى سبيل المثال من الشكل (29.9) ـ الصف العاشر، يمثل معامل درجة الحرارة للقدرة، وهو على صورة نسبة مئوية من القدرة الإجمالية وبالتالي يجب تحويل هذه المعلومة إلى الوحدات المناسبة لاستخدامها في المعادلة العامة كالتالي:

$$\beta_p = -(0.5+0.05)\times\frac{150}{100} = -0.825\ W/^\circ C \qquad (87.9)$$

وهذه القيمة قريبة جداً للقيمة التي أوردناها في الشكل (28.9) أعلاه والتي كانت حوالي 0.895-. الإشارة السالبة تشير إلى أنه بزيادة درجة حرارة سطح الخلية درجة واحدة عن القيمة القياسية وهي $25^\circ C$، تنخفض القدرة بمقدار

$0.825W$، وهي قيمة لا يمكن إهمالها خاصة وأن الخلايا الشمسية قد تعمل عند درجات حرارة تقارب $100^\circ C$ فوق درجة الحرارة القياسية.

Electrical Characteristics

		SX 150
1	Maximum power (P_{max})	150W
2	Voltage at P_{max} (V_{mp})	34.5V
3	Current at P_{max} (I_{mp})	4.35A
4	Warranted minimum P_{max}	140W
5	Short-circuit current (I_{sc})	4.75A
6	Open-circuit voltage (V_{oc})	43.5V
7	Maximum system voltage	600V
8	Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C
9	Temperature coefficient of V_{oc}	– (160±20)mV/°C
10	Temperature coefficient of power	– (0.5±0.05)%/°C
11	NOCT	47±2°C

شكل (29.9) جدول الخصائص الكهربائية لخلايا شمسية من نوع SX 150

أما عن تأثير شدة الإشعاع الشمسي، فكما هو مبين في الشكل (26.9) فإن العلاقة مع فرق الجهد تكون لوغارتمية وعلاقة شدة الإشعاع مع شدة التيار تكون خطية.

وبهذا فان معادلة التصحيح النهائية لفرق الجهد بمشاركة تأثير درجة الحرارة وشدة الإشعاع الشمسي كالتالي:

$$V = [V_{STC} + \beta_V (T_{cell} - T_{STC})] + \ln\left(\frac{H}{H_{STC}}\right) \qquad (88.9)$$

ومعادلة تصحيح شدة التيار يمكن صياغتها على الصورة التالية:

$$I = [I_{STC} + \beta_I (T_{cell} - T_{STC})] \times \left(\frac{H}{H_{STC}} \right) \qquad (89.9)$$

3.5.9 حسابات منظومات الخلايا الشمسية

تنقسم إجراءات حساب حجم المنظومات الشمسية إلى أربع مراحل أساسية (sierrasolar.com):

1. حساب حمل المنظومة؛
2. حساب حجم منظومة التخزين؛
3. حساب حجم الخلايا الشمسية؛
4. الحسابات الاقتصادية.

في هذا الجزء سنقوم بدراسة المراحل الثلاث الأولى لتعيين حجم المنظومة الشمسية، أما المرحلة الرابعة فيمكن الرجوع إلى الفصل الخامس لإجراء التقييم الاقتصادي والبيئي.

حساب حمل المنظومة:

الخطوة الأولى: أحسب أحمال التيار المتردد (AC). في حالة عدم وجود أحمال مترددة تجاوز إلى الخطوة الثانية.

1. عدد كل أحمال التيار المتردد، القدرة وعدد ساعات التشغيل الأسبوعية كما هي مبينة في الجدول أدناه. أجمع كافة الوات ساعة لكل أسبوع لتعيين الاستهلاك الأسبوعي من AC.

وصف الحمل	قدرة الجهاز [W]	×	عدد ساعات التشغيل في الأسبوع [hr/wk]	=	الاستهلاك الأسبوعي [Wh/wk]
	إجمالي الاستهلاك الأسبوعي للأحمال المترددة				

2. الاستهلاك الحقيقي في الأسبوع: اضرب الفقرة 1 في 1.15 لتعويض الخسائر في محول التردد.
3. فولتية محول التردد من AC إلى تيار مستمر DC: عادة ما يكـون 12 أو 24 V. هذا سيكون فولتية المنظومة DC.
4. بقسمة ناتج الفقرة 2 على ناتج الفقرة 3، الناتج يمثل الأمبير ساعة لكل اسبوع $Amph/wk$ المستهلك من الأجهزة AC.

الخطوة الثانية: احسب الأحمال المستمرة DC.

5. عدد كل أحمال التيار المستمر، القدرة وعدد ساعات التشـغيل الأسـبوعية كمـا هي مبينة في الجـدول أدنـاه. أجمـع كافـة الـوات سـاعة لكـل أسـبوع لتعـيين الاستهلاك الأسبوعي من DC.

وصف الحمل	قدرة الجهاز $[W]$	×	عدد ساعات التشغيل في الأسبوع $[hr/wk]$	=	الاستهلاك الأسبوعي $[Wh/wk]$
إجمالي الاستهلاك الأسبوعي للأحمال المستمرة					

6. فولتية النظام المستمر. غالباً ما يكون 12 أو 24 V.
7. خارج قسمة الفقرة 5 على الفقرة 6 يمثل الأمبير ساعة الأسبوعي المستهلك مـن قبل أحمال DC.
8. الأمبير ساعة الأسبوعي المستهلك من قبل أحمال AC، من الفقرة 4.
9. أجمع الفقرة 7 مع الفقرة 8 نحصل على الأمبير ساعة الكلي المسـتهلك لجميـع الأحمال.
10. بقسمة الفقرة 9 على 7 أيام، نحصل على معدل الأمبير ساعة الكلي اليومي.

حساب حجم بطاريات التخزين:

1. من الفقرة 10 السابقة، الأمبير ساعة المطلوب تغطيته من المنظومة الشمسية.
2. أكبر عدد الأيام الغائمة المستمرة المتوقعة خلال السنة (من 5 إلى 10 أيام لمعظم المناطق).
3. أضرب ناتج الفقرة 1 في ناتج الفقرة 2.
4. أقسم ناتج الفقرة 3 على 0.8 للحفاظ على مستوى الشحن في البطاريات في حدود 20% دائماً.
5. أختر المعامل المناسب من الجدول أسفله لتغطية العجز الحاصل في الفترة الشتوية نتيجة لانخفاض درجة الحرارة.

درجة حرارة البطارية، $^{\circ}C$	المعامل
26.7	1.00
21.2	1.04
15.6	1.11
10.0	1.19
4.4	1.30
-1.1	1.40
-6.7	1.59

6. أضرب ناتج الفقرة 4 بناتج الفقرة 5، وهذا العدد يمثل الحجم المثالي لبطارية التخزين.
7. أختر الأمبير ساعة للبطارية (على سبيل المثال، الأمبير ساعة للبطاريات من نوع Trojan L-16، هو 360 أمبير ساعة).
8. أقسم ناتج الفقرة 6 على ناتج الفقرة 7، هذا الرقم يمثل عدد البطاريات المطلوبة المتصلة على التوازي.

9. قرب ناتج الفقرة 8 إلى أقرب عدد صحيح.

10. أقسم فولتية المنظومة على فولتية نوع البطارية المختارة (على سبيل المثال، فرق الجهد للبطاريات من نوع Trojan L-16، هو 6 فولت)، فنحصل على عدد البطاريات المطلوبة المتصلة على التوالي.

11. أضرب ناتج الفقرة 9 في ناتج الفقرة 10، نحصل على العدد الكلي للبطاريات.

حساب حجم ألواح الخلايا الشمسية:

1. نحن بحاجة إلى ناتج الفقرة 10 من حساب حمل المنظومة.

2. أضرب ناتج الفقرة 1 في 1.2 لتغطية الخسائر في عملية شحن وتفريغ البطاريات.

3. عدد ساعات السطوع الشمسي في المنطقة.

4. أقسم ناتج الفقرة 2 على ناتج الفقرة 3، للحصول على الأمبير الكلي المطلوب من الخلايا الشمسية.

5. الأمبير والفولتية المثالية للخلايا الشمسية، تحصل عليه من كتيب مواصفات الخلايا الشمسية.

6. إجراء تصحيح درجة حرارة وشدة الإشعاع الشمسي لشدة التيار وفرق الجهد، كما في المعادلتين (88.9) و (89.9).

7. عدد الألواح الشمسية على التوازي هو خارج قسمة الفقرة 4 على الفقرة 6.

8. قرب ناتج الفقرة 6 إلى أقرب عدد صحيح.

9. عدد الألواح على التوالي في كل خط لتزويد فرق الجهد للبطاريات هو خارج قسمة فولتية منظومة التخزين على الفقرة 6.

10. العدد الكلي للألواح الشمسية المطلوبة هو حاصل ضرب الفقرة 7 في الفقرة 9.

مثال 3.9:

احسب حجم المنظومة الشمسية لتزويد الأجهزة المدرجة أدناه بالطاقة الكهربائية، لمنطقة متوسط درجة حرارة الهواء الجوي فيها $30^{\circ}C$، ومتوسط شدة الإشعاع الشمسي فيها $800\, W/m^2$. وقدرة وعدد ساعات التشغيل الأسبوعية مدرجة في الجدول. معامل الأمان على أجهزة التيار المستمر فقط 30%، نسبة تشغيل المنظومة الاحتياطية 10%، أي أن نسبة التغطية للطاقة الشمسية 90% لأحمال التيار المتردد. فولتية محول التردد 12 V.

الحل

بتتبع الخطوات المدرجة في الفقرة 3.6.9:

الخطوة الأولى: حساب أحمال التيار المتردد

جدول وصف أحمال التيار المتردد

وصف الحمل	قدرة الجهاز $[W]$	×	عدد ساعات التشغيل في الأسبوع $[hr/wk]$	=	الاستهلاك الأسبوعي	الوحدات
إنارة	13		21		273	Wh/wk
جهاز مرئي	45		21		945	Wh/wk
مروحة	20		28		560	Wh/wk
إجمالي الاستهلاك الأسبوعي لأحمال التيار المتردد					1778	Wh/wk
ما نسبته فقط 90% من الحمل سيغطى عن طريق الطاقة الشمسية					1600.2	Wh/wk
الاستهلاك الحقيقي في الأسبوع					1840.23	Wh/wk
الأمبير ساعة الكلي في الأسبوع					153.4	$Amph/wk$

الخطوة الثانية: حساب أحمال التيار المستمر

جدول وصف أحمال التيار المستمر

وصف الحمل	قدرة الجهاز $[W]$	×	عدد ساعات التشغيل في الأسبوع $[hr/wk]$	=	الاستهلاك الأسبوعي	الوحدات
حاسوب	40		24.5		980	Wh/wk
راديو	35		14		490	Wh/wk
معدات أخرى	500		1.75		875	Wh/wk
إجمالي الاستهلاك الأسبوعي لأحمال التيار المستمر					2345	Wh/wk
معامل أمان 30% زيادة عن إجمالي حمل التيار المستمر					3048.5	Wh/wk
الأمبير ساعة الكلي في الأسبوع					254	$Amph/wk$

الأمبير ساعة الأسبوعي المستهلك من قبل أحمال AC، DC: 407.4 $Amph/wk$.

معدل الأمبير ساعة الكلي اليومي: 58.2 $Amph/day$.

حساب حجم بطاريات التخزين:

بفرض أن عدد الأيام الغائمة المستمرة المتوقعة خلال السنة: 5 أيام

كمية الأمبير ساعة المطلوبة: 291 $Amph$

للحفاظ على مستوى الشحن في البطاريات في حدود 20%: 363.75 $Amph$

بفرض أن درجة حرارة الجو شتاءاً حوالي $10\ ^{\circ}C$ وبذلك يكون معامل التصحيح للبطارية هو 1.19.

كمية الأمبير ساعة المثالية للبطارية باعتبار معامل تصحيح درجة الحرارة: 432.9 $Amph$.

الخصائص الكهربائية الفولت والأمبير ساعة للبطاريات من نوع Trojan L-16، هو 6 V 360 $Amph$.

عدد البطاريات المطلوبة المتصلة على التوازي: 2 بطارية.

عدد البطاريات المطلوبة المتصلة على التوالي: 2 بطارية.

العدد الكلي للبطاريات: 4 بطاريات.

حساب حجم ألواح الخلايا الشمسية:

الحمل اليومي باعتبار الخسائر في عملية شحن وتفريغ البطاريات: 69.8 $Amph/day$.

عدد ساعات السطوع الشمسي في المنطقة: 6 h/day.

الأمبير الكلي المطلوب من الخلايا الشمسية: 11.64 Amp.

الأمبير والفولتية المثالية للخلايا الشمسية، تحصل عليه من كتيب مواصفات الخلايا الشمسية: 34.5 V، 4.35 Amp.

إيجاد درجة حرارة سطح الخلية:

$$T_{cell} = 30 + 7.8 \times 10^{-2} \times 800 = 92.4^{\circ} C$$

إجراء تصحيح درجة حرارة وشدة الإشعاع الشمسي لشدة التيار وفرق الجهد:

$$V = \left[34.5 - 180 \times 10^{-3} (92.4 - 25)\right] + \ln\left(\frac{800}{1000}\right) = 22.145 \, V$$

$$\beta_I = (0.065 + 0.015) \times \frac{4.75}{100} = 3.8 \times 10^{-3} \; Amp / {}^{\circ}C$$

$$I = \left[4.35 + 3.8 \times 10^{-3} (92.4 - 25)\right] \times \left(\frac{800}{1000}\right) = 3.685 \; Amp$$

عدد الألواح الشمسية على التوازي: 4.

عدد الألواح على التوالي: 1.

العدد الكلي للألواح الشمسية المطلوبة: 4.

المراجع

1. Berdahl, P., Martin, M., *Solar Energy*, **32**, 663 (1984). "Emissivity of Clear Skies."
2. Bernardes, M.A., VoB, A., Weinrebe, G., *Solar Energy*, **75**, 511 (2003)."Thermal and Technical Analysis of Slar Chimney."
3. Castillo, M. A., *Spirit of Enterprise: Rolex Awards*, **58** (1984). "A New Solar Chimney Design to Harness Energy from Atmosphere."
4. Churchill, S. W., Chu, H. H. S., *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **18**, 1323 (1975). "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate."
5. Cohen, G.E., Kearny, D.W., Kolb, G.J., *SANDIA Report, SAND 99-1290*, (1999). "Final Report on the Operation and Maintenance Improvement Program for Concentrating Solar Power Plants."
6. Colebrook, C. F., *J. Institute Civil Eng.*, **11**, 133 (1939). "Turbulent Flow in Pipes with Particular Reference to the Transition Region between the Smooth and Rough Pipes Law."
7. Elsayed, M.M, Taha, I.S., Sabbagh, J.A., *Design of Solar Thermal Systems*, Scientific Publishing Center, King Abdulaziz University, Jeddah- Saudi Arabia Kingdom, (1984).
8. Fisk, M.J., Anderson, H.C., *Introduction to Solar Technology*, Addison – Wesley, London, (1982).
9. Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G., Schlaich, J., *Int. J. Solar Energy* 2, **3** (1983). "Solar Chimneys, Part I: Principle and Constraction of the Pilot Plant in Mazanares."
10. Haaf, W., *Int. J. Solar Energy* 2, **141** (1984). "Solar Chimneys, Part II: Preliminary Test Results from the Mazanares Pilot Plant."

11. Hidebrandt, A.F., Dasgupta, S.J., *Solar Energy Engineering, Trans. ASME*, **102**, 91 (1980). "Survey of Power Tower Technology."

12. http//www.sierrasolar.com, Create a System, (2002).

13. Kut, D., Hare, G., *Applied Solar Energy*, Cambridge University Press, England, 2nd ed., (1983).

14. Manuel Romero, Maria, J. Marcos, *Proceedings of the Solar 2000 Solar Powers Life – Share the Energy*, June 17-22 (2000), Madison - Wisconsin. "Design and Implementation Plan of a 10MW Solar Tower Power Plant Based on Volumetric – Air Technology in Seville - Spain."

15. Mulhalland, G. P., *Solar Energy Engineering, Trans. ASME*, **105**, 243 (1983). "Determination of Heliostat and Concentrator Size for Solar Furnace Facilities."

16. Nassar, Y.F., Sergievsky, E.D., Salem A.A., *Proceedings of the International conference on renewable energy for regional development CIGT section IV*, August 28-31 (2001), Bogor – Indonesia. "A Creation of Mathematical Model for Photovoltaic/Thermal (PV/T) Solar Flat – Plate Collector."

17. Nassar, Y.F., Yousif, S., Salem A.A., *Proceedings of the 8th Arabic International Solar Energy conference & Regional World Renewable Energy Congress*, March 8-10 (2001), Kingdom of Bahrain. "The Reliability of the Photovoltaic Utilization in Southern Cities of Libya."

18. Nassar, Y.F., Yousif, S.A., Salem, A.A., *Proceedings of the World Renewable Energy Congress VIII*, August 28- September 3 (2004), Denver, Colorado-USA.. "The Choice of Solar Energy in the Field of Electrical Generation – Photovoltaic or Solar Thermal – For Arabic Region."

19. Petukhov, B. S., Popov, N. V., *High Temperature*, **1**, 69 (1963). "Theoretical Calculation of Heat Transfer and Frictional Resistance in

Turbulent Flow in Tubes of an Incompressible Fluid with Variable Physical Properties."

20. Schlichting, H., Gersten, K., Krause, E., Mayes, K., Oertel, H., Boundary Layer Theory, Springer Verlage, Berlin, (1999).

21. Sukhatme, S., *Solar Energy*, McGraw-Hill, New Delhi, (1997).

22. Yan, M. Q., Sherif, S. A., Kridli, G.T., Lee, S.S., Padki, M.M., *Ind. Applic. Fluid Mech. ASME FED*, **2**, 125 (1991). "Thermo-Fluids Analysis of Solar Chimneys."

23. Zehedi, A. The Engineering and Economics of Solar Photovottaic Energy Systems, New world Publishing, Melbourne, Australia, (2004).

الفصل العاشر
تحليل المنظومات الحرارية الشمسية المنزلية

1.10 مقدمة

يعتبر تسخين الماء عن طريق الطاقة الكهربائية غير اقتصادي. حيث استهلاك وحدة حرارية واحدة كهربائية لتسخين الماء يتطلب حوالي 4 وحدات حرارية من النفط (باعتبار كفاءة التحويل والتوصيل 25%). وينطبق هذا على كافة العمليات الحرارية من تدفئة وتسخين مياه وتبريد وتكييف وتجفيف.

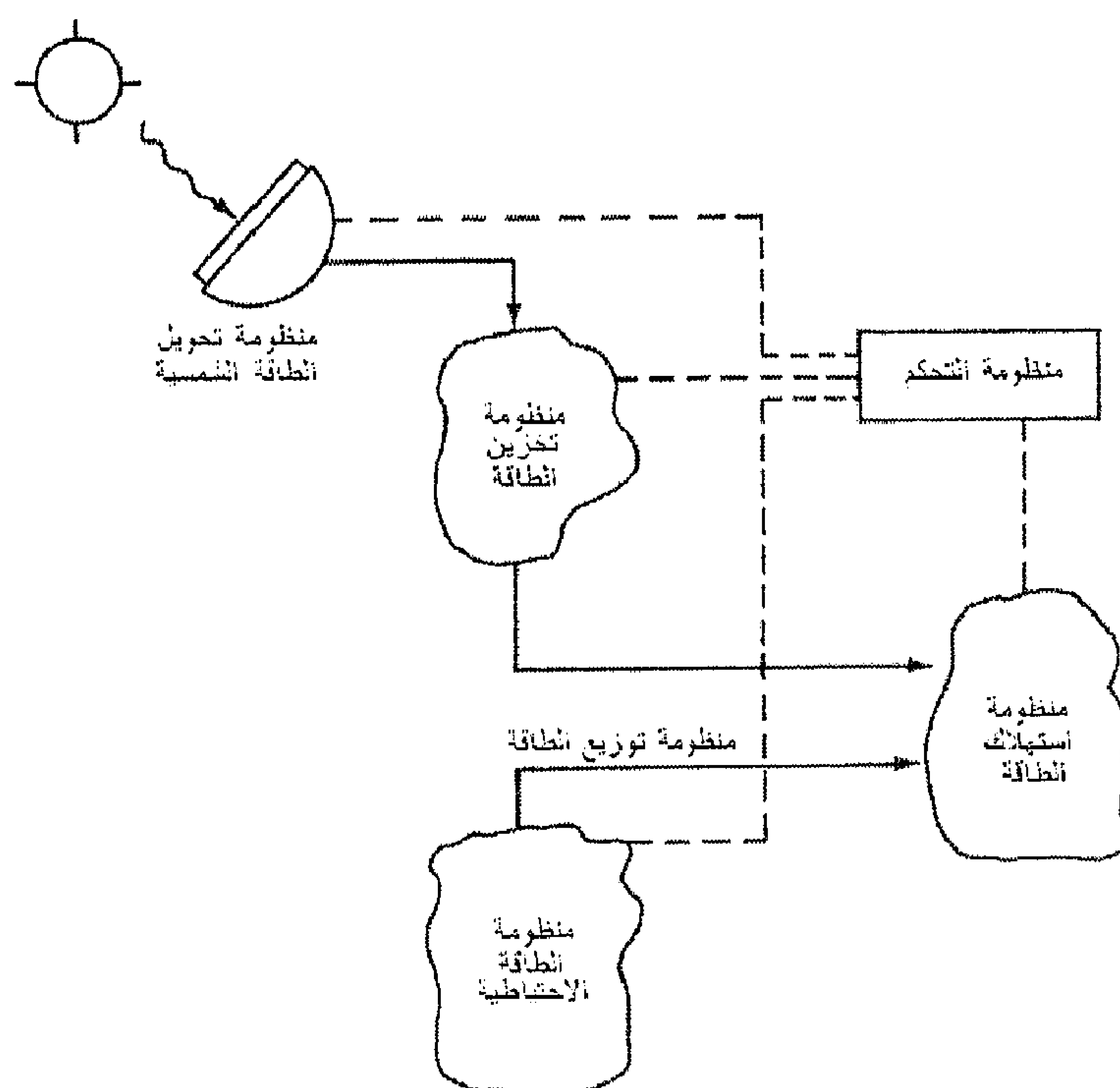
وتعتبر منظومات تسخين الماء والتدفئة من أكثر التطبيقات الشمسية وانتشاراً، وملائمة الطاقة الشمسية للاستخدامات المنزلية خاصة. في الدول النامية يستهلك القطاع المنزلي ما نسبته 32% من إجمالي الاستهلاك القومي للطاقة الكهربائية، والجزء الأكبر من هذه الطاقة تذهب لتسخين المياه غالباً وللتدفئة في بعض المناطق. وتشير الإحصائيات إلى أن ما نسبته 15% من الاستهلاك الكهربائي القومي تستهلك في تسخين المياه. وبالتالي فان توفير أي كمية من هذه النسبة يشكل توفيراً قومياً في النفط وتخفيض الحمل على الشبكة العامة للكهرباء.

تتكون أي منظومة حرارية شمسية من عدة عناصر أساسية تُحدد أدائها. هذه العناصر كما هي مبينة في الشكل (1.10) وهي (Kreith, Kreider, 1978):

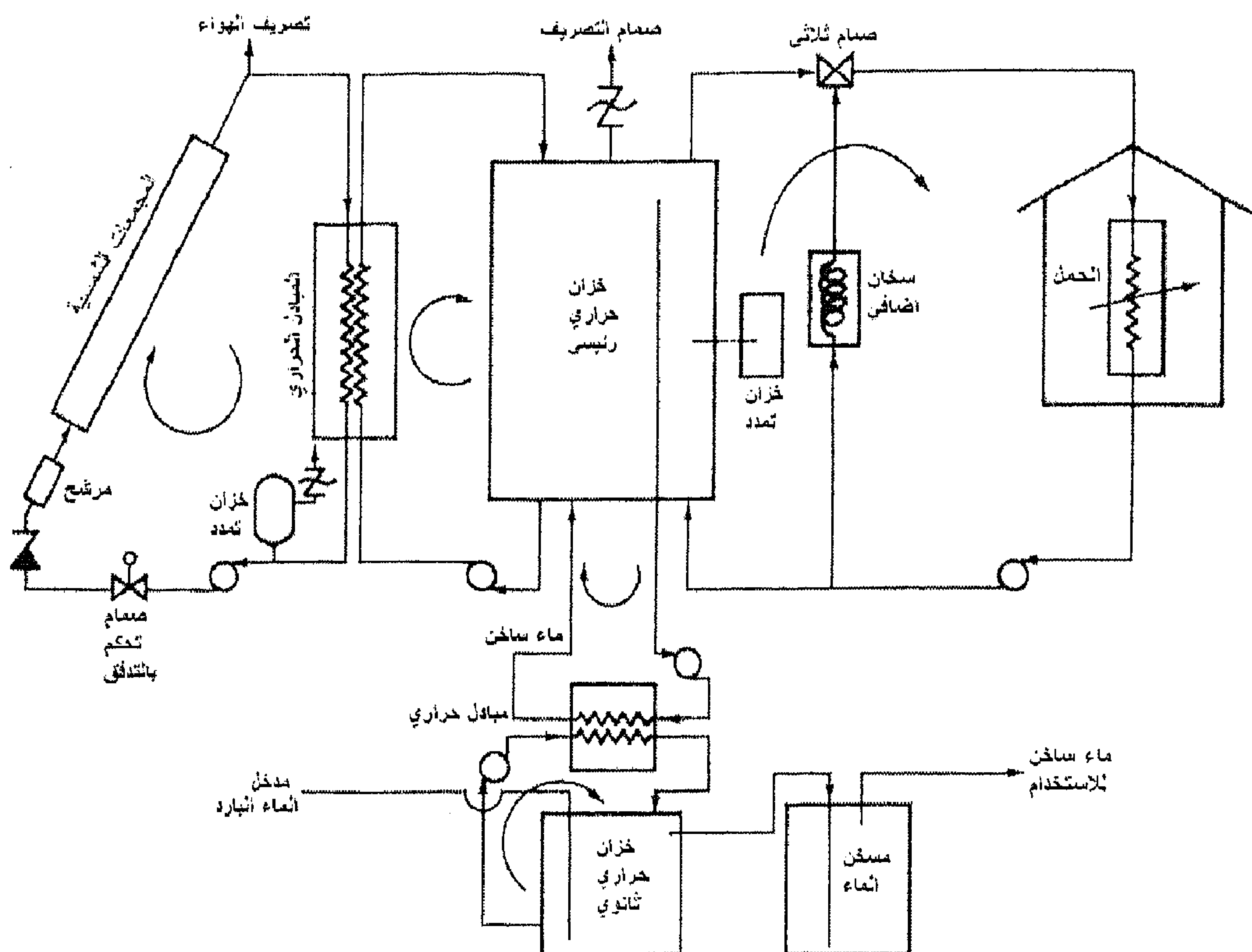
1. منظومة تحويل الطاقة الشمسية (مجمع شمسي مستوي أو مركز).
2. منظومة تخزين الطاقة.
3. منظومة التحكم.
4. منظومة الطاقة الاحتياطية.
5. منظومة استهلاك الطاقة.
6. منظومة توزيع الطاقة.

وقد تشتمل بعض المنظومات على مبادل حراري أو أكثر، وذلك في حالة اختلاف المائع العامل في جهة المجمع الشمسي عنه في جهة الخزان الحراري، كالمنظومات العاملة على أساس المجمعات الهوائية أو محاليل ضد التجمد وضد الصدأ ... إلخ.

ترتبط هذه الأجزاء ببعضها كما في الشكل (2.10) وتكون مجتمعة المنظومة الحرارية الشمسية. في الفصول السابقة ويتم بالتفصيل تناول كل من المجمعات الشمسية والخزانات الحرارية، في هذا الفصل سنتطرق إلى باقي أجزاء المنظومة ودراسة السلوك الحراري الكلي للمنظومة كوحدة متكاملة وصولاً إلى التصميم الأمثل، فضلاً عن تعريف وحساب بعض الدلائل الفيزيائية والاقتصادية المهمة في مجال الطاقة الشمسية.



شكل (1.10) رسم توضيحي لمكونات منظومة حرارية شمسية



شكل (2.10) رسم توضيحي لمنظومة تسخين مياه وتدفئة منزلية نموذجية مبيناً مكوناتها الأساسية

2.10 النماذج الرياضية لمكونات منظومات التسخين الحرارية

1.2.10 المجمعات الشمسية

يعتبر المجمع الشمسي أهم عنصر في المنظومة الشمسية، فعنده يتم تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية مفيدة يحملها مائع التشغيل في المنظومة. في الفصل الثالث تمت دراسة المجمعات الشمسية المستوية والمركزة، والأمر يختلف قليلاً في حالة دمج هذه المجمعات في المنظومة الشمسية، ولكن تبقى الأساسيات دائماً ثابتة. للمجمعات الشمسية المستوية، وتبقى المعادلة (54.3) سارية المفعول. وبالتالي يمكن كتابة معدل الطاقة المفيدة المكتسبة في المجمع الشمسي كالتالي (Duffie, Beckman, 1991):

$$q_u = A_c \ F_R \left[H_a - U_c \left(T_{fi} - T_a\right)\right]^+ \qquad (1.10)$$

حيث تدل الإشارة + على وجود جهاز تحكم، بحيث تستخدم فقط القيم الموجبة للطاقة المفيدة المكتسبة، ولا يتم تشغيل المضخات في منظومات التدوير القسري ليس فقط عندما $q_u > 0$ وإنما عندما تكون $q_u > q_{min}$، حيث تمثل q_{min} قدرة كافة المضخات العاملة والفواقد الحرارية في المنظومة. وفي المنظومات الحقيقية يحدث هذا بتحسس درجات حرارة دخول وخروج المائع من وإلى المجمع الشمسي، ويتم إعطاء الأمر بالتشغيل عندما تكون الطاقة المُستفادة المكتسبة عند آخر نقطة في المنظومة الشمسية أكبر من مجموع قدرات المضخات العاملة وجميع الفواقد الحرارية من المنظومة. وبالتالي فان الطاقة المفيدة المكتسبة يمكن أن تعطى بالعلاقة التالية:

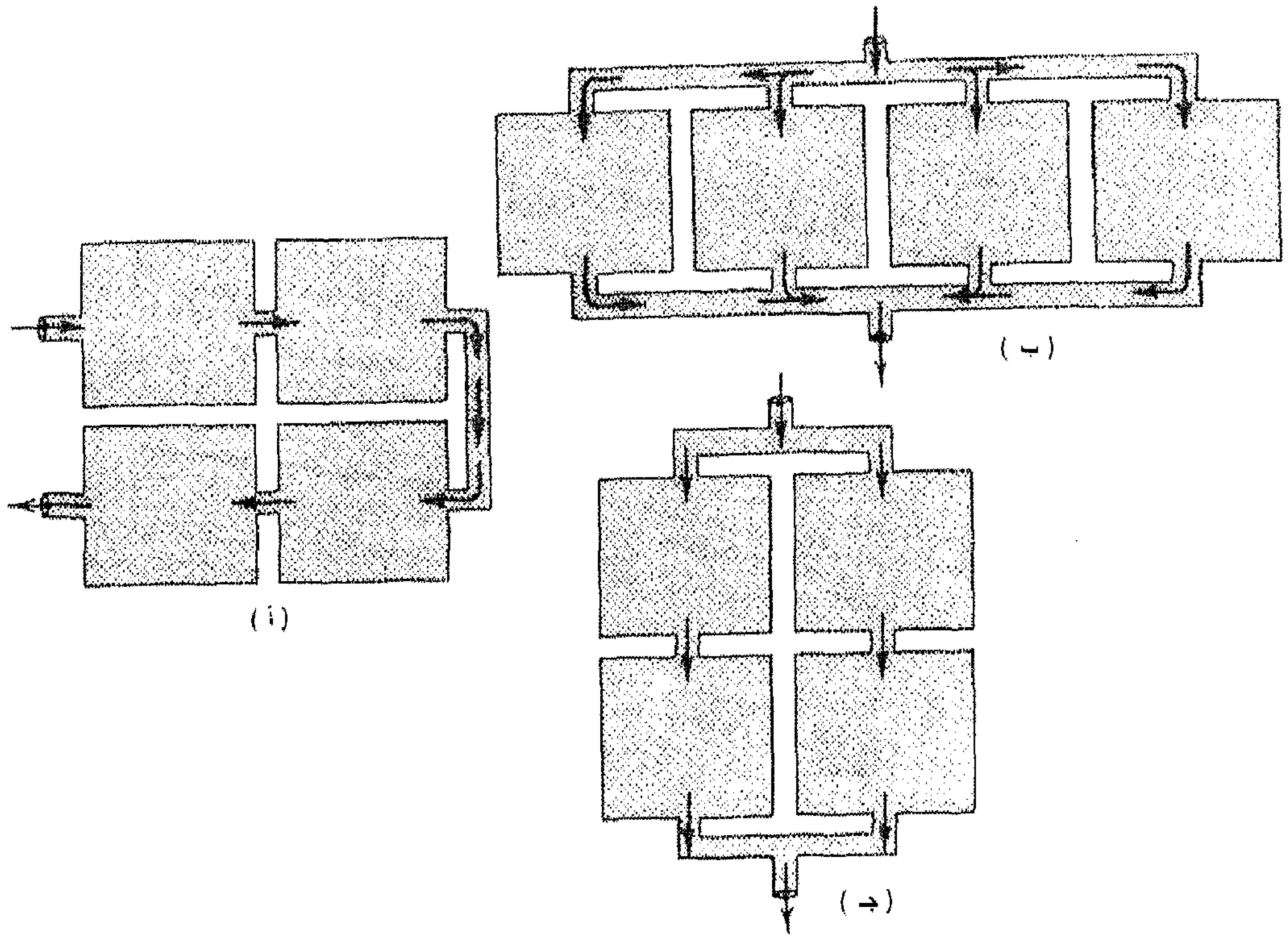
$$q_u = \dot{m} \, Cp \left(T_{fo} - T_{fi}\right) \qquad (2.10)$$

حيث تمثل $\dot{m}$ معدل تدفق المائع خلال المجمع الشمسي.

مصفوفات المجمعات الشمسية

تتألف المنظومة الشمسية من المجمعات الشمسية المتصلة على التوالي أو التوازي أو على التضاعف (توالي وتوازي معاً) كما هو مبين في الشكل (3.10). وأداء هذه المنظومات يعتمد بدرجة كبيرة على كيفية ترتيب المجمعات الشمسية، بمعنى أنها تعتمد على معدل تدفق المائع خلال الأنبوب الصاعد في المجمعات الشمسية ودرجة دخول المائع للمجمع الواحد.

إن المنظومات المتكونة من عدد N من المجمعات الشمسية تكون قادرة على تجميع طاقة حرارية بمقدار N ضعف مما يجمعه مجمع شمسي واحد.



شكل (3.10) طرق توصيل المجمعات الشمسية (أ) على التوالي؛ (ب) على التوازي و(جـ) على التضاعف

إن الهدف من ربط المجمعات الشمسية بهذه الصورة هو الحصول على طاقة حرارية أكبر مما هي عليه في المجمع الواحد، ولصعوبة تصنيع مجمع شمسي بأبعاد كبيرة كقطعة واحدة، فإننا نلجأ إلى توصيل قطع المجمعات الشمسية الصغيرة مع بعضها بهذه الطريق. وعند ربط المجمعات على التوالي فيجب ربط مخرج كل مجمع شمسي بمدخل الأخر الذي يليه كما هو مبين في الشكل (3.10 – أ)، نتيجة لذلك فانه يجب زيادة معدل تدفق المائع خلال المجمعات الشمسية، وكنتيجة لهذه الزيادة ومع ثبات مساحة مقطع الأنابيب ستؤدي هذه الزيادة إلى زيادة معامل الاحتكاك كنتيجة لزيادة السرعة، فضلاً عن زيادة مسار المائع وهذا بدوره يجعل المقاومة كبيرة للمائع، ولذا يجب

استخدام مضخات ذات ضغط مرتفع مما سيؤدي إلى زيادة في سعر المنظومة. ما يميز منظومة التوالي هو أن الخصائص الحرارية تكون مختلفة لكل مجمع من المجمعات المتصلة على التوالي وذلك لاختلاف درجة دخول المائع إلى كل منها.

أمّا في منظومة التوازي المبينة في الشكل (3.10 – ب)، تربط مناطق دخول المائع لكل مجمع شمسي مع أنبوب تغذية مشترك وكذا الحال بالنسبة لمنطقة خروج المائع، حيث تربط مشتركة في منفذ واحد. وتمتاز منظومات التوازي بأن مقاومة المائع تكون صغيرة. إن درجة حرارة وكفاءة منظومات التوازي المشتملة على N من المجمعات الشمسية هي نفسها بالنسبة للمجمع الواحد، إلا أن معدل الكسب الحراري يكون N مرة أكبر مما في المجمع الواحد.

عملياً، غالباً ما نجبر على استخدام المنظومات المتصلة على التضاعف كما في الشكل (3.10 – جـ) وذلك لخصائصها الحرارية التي تجمع خصائص منظومات التوالي والتوازي معاً، وهي الزيادة في درجة الحرارة (منظومات التوالي) والزيادة في الكسب الحراري (منظومات التوازي).

تكون الطاقة المكتسبة الكلية في نظام متكون من مجمعين متصلين على التوالي على النحو التالي:

$$q_{u,1} + q_{u,2} = A_1 F_{R1} [H_a - U_{c1} (T_i - T_a)] + A_2 F_{R2} [H_a - U_{c2} (T_{o,1} - T_a)] \quad (3.10)$$

حيث: T_i تمثل درجة حرارة دخول المائع إلى المنظومة؛ $T_{o,1}$ تمثل درجة حرارة خروج المائع من المجمع الأول.

درجة حرارة خروج المائع من المجمع الأول، تعطى بالعلاقة التالية:

$$T_{o,1} = T_i + \frac{q_{u,1}}{\dot{m} Cp} \quad (4.10)$$

بالتعويض عن قيمة $T_{o,1}$ من المعادلة (4.10) في المعادلة (3.10)، نحصل على:

$$q_{u,1+2} = H\left[A_1 F_{R1} (\tau\alpha)_1 (1-K) + A_2 F_{R2} (\tau\alpha)_2\right] - \left[A_1 F_{R1} U_{c1} (1-K) + A_2 F_{R2} U_{c2}\right](T_i - T_a) \quad (5.10)$$

حيث: K تُعطى بالعلاقة التالية:

$$K = \frac{A_2 F_{R2} U_{c2}}{\dot{m} Cp} \quad (6.10)$$

بمقارنة المعادلة (5.10) بالمعادلة العامة (1.10) يمكن استنتاج أن:

$$A_c = A_1 + A_2 \quad (7.10)$$

$$F_R (\tau\alpha) = \frac{A_1 F_{R1} (\tau\alpha)_1 (1-K) + A_2 F_{R2} (\tau\alpha)_2}{A_c} \quad (8.10)$$

$$F_R U_c = \frac{A_1 F_{R1} U_{c1} (1-K) + A_2 F_{R2} U_{c2}}{A_c} \quad (9.10)$$

فإذا ما تم توصيل 3 أو أكثر من المجمعات الشمسية على التوالي، فان هذه المعادلات يمكن استخدامها للمجمعين الأولين فقط ثم يُعرف مجمعان أخريان وبالتالي يمكن أن نتعامل مع المجمعين الجديدين كمنظومة متصلة على التوالي ومتكونة من مجمعين فقط. (Oonk, et al., 1979) بين أنه لعدد N من المجمعات الشمسية المماثلة المتصلة على التوالي وباستخدام التقنية السابقة نحصل على:

$$F_R (\tau\alpha) = F_{R1} (\tau\alpha)_1 \left[\frac{1-(1-K)^N}{NK}\right] \quad (10.10)$$

$$F_R U_c = F_{R1} U_{c1} \left[\frac{1-(1-K)^N}{NK}\right] \quad (11.10)$$

2.2.10 منظومة التوزيع الحراري

يتطلب الاستخدام العملي للطاقة الشمسية نقل الطاقة المكتسبة في المجمع الشمسي إلى الأجزاء الأخرى في المنظومة، ومن ثم إلى أماكن الاستهلاك. وبما أن مركبات المنظومة الحرارية الشمسية تحتوي على مائع بدرجة حرارة أعلى من درجة حرارة المحيط، فإن الفقد في الحرارة سيحدث من المنظومة إلى الوسط. يتحرك المائع في المنظومة الشمسية في أنابيب إما أن تكون مستطيلة (للغازات) أو دائرية المقطع (للسوائل)، كما هو مبين في الشكل (4.10). وتوضع العوازل على السطح الخارجي للأنبوب للحد من انتقال الحرارة. والفقد الحراري بالتوصيل هو الغالب في الأنابيب عبر مقاومة العازل ولهذا أهملت مقاومات الحمل الحراري. والفاقد الحراري للأنابيب الدائرية المقطع q_{cyl}، يُعطى بالعلاقة التالية (Potter, 1959):

$$q_{cyl} = \left[\frac{2\pi L k}{\ln\left(D+2t\right)/D} \right] \left(T_f - T_a\right) \qquad (12.10)$$

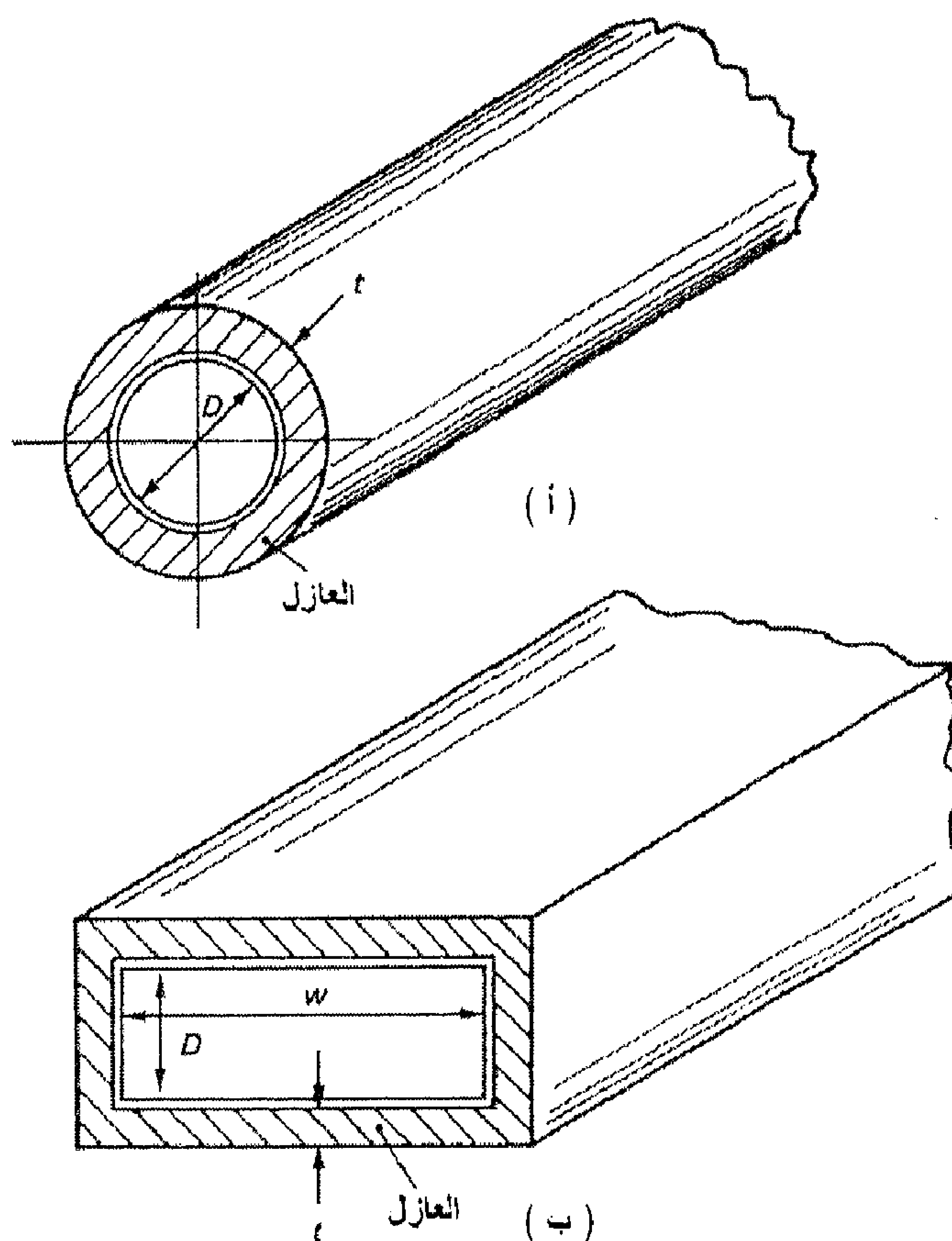
حيث: L هو طول الأنبوب؛ k هي الموصلية الحرارية لمادة العزل؛ T_f تمثل درجة حرارة المائع داخل الأنبوب؛ T_a هي درجة حرارة المحيط؛ الأبعاد t , D مُعرفة في الشكل (4.10).

فقد الطاقة من خلال الأنابيب المستطيلة المقطع q_{rect}، تُعطى بالعلاقة التالية (Kreith, 1973):

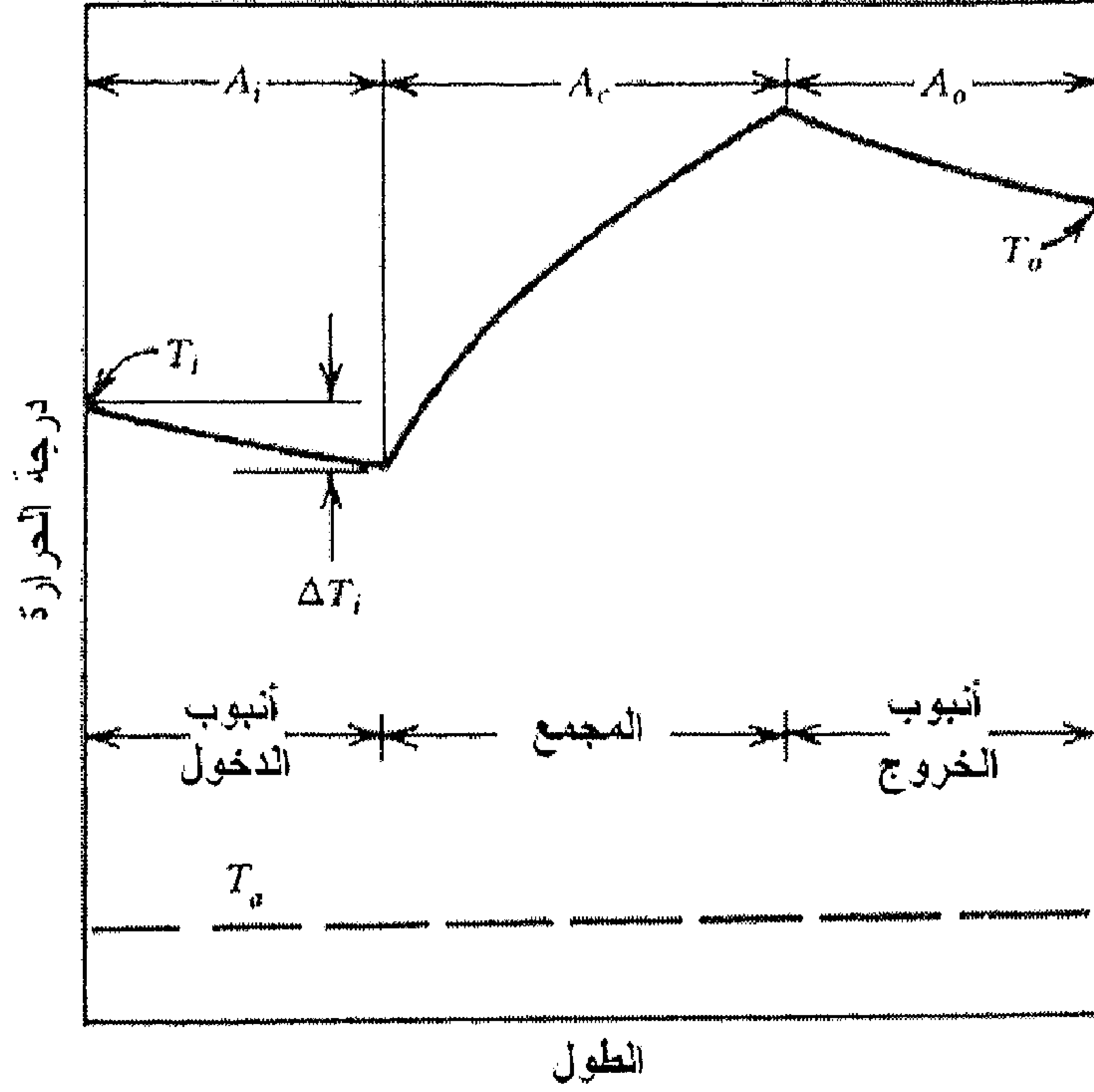
$$q_{rect} = k\,L \left(\frac{2\,w + 2\,D}{t} + 2.16 \right) \left(T_f - T_a\right) \qquad (13.10)$$

باعتبار توزيع درجات حرارة المائع في أنبوب الدخول - المجمع الشمسي – أنبوب الخروج في منظومة شمسية، المبين في الشكل (5.10)، (Beckman, 1978).

يدخل المائع أنبوب الدخول عند درجة حرارة T_i، ونتيجة للفقد الحراري إلى المحيط عند درجة حرارة T_a. فإن الانخفاض في درجة حرارة المائع يكون بمقدار ΔT_i قبل دخوله إلى المجمع الشمسي. يمر المائع بعدها في المجمع الشمسي ويُسخن إلى درجة حرارة الخروج من المجمع الشمسي ، ثم تنخفض درجة حرارة المائع إلى T_o نتيجة الفقد الحراري بين أنبوب الخروج والمحيط.



شكل (4.10) نموذج لأنظمة نقل الطاقة (أ) أنبوب دائري المقطع؛ (ب) أنبوب مستطيل المقطع



شكل (5.10) توزيع درجات الحرارة خلال المجمع الشمسي – أنابيب التوصيل

من معادلة الاتزان الحراري للنظام، فان الطاقة الحرارية المفيدة المكتسبة من النظام تكون على الصورة التالية:

$$q_u = (\dot{m}\, Cp)_c\, (T_o - T_i) \tag{14.10}$$

هذه الطاقة يمكن أن تُصاغ بدلالة الطاقة المكتسبة في المجمع الشمسي وذلك عن طريق خصم الطاقة المفقودة من خلال الأنابيب:

$$q_u = A_c\ F_R\, [H_a - U_c\ (T_i - \Delta T_i - T_a)] - \text{Losses} \tag{15.10}$$

فواقد الأنابيب Losses تساوي تكامل الفواقد على طول أنبوب الدخول والخروج، وتُعطى كما يلي:

$$\text{Losses} = U_d \int (T - T_a)\, dA \tag{16.10}$$

حيث: U_d تمثل معامل الفقد الحراري الكلي من الأنابيب. ويجب أن تكون الفواقد من الأنابيب الجيدة العزل صغيرة، وبالتالي فان نتيجة التكامل في المعادلة (16.10) يمكن أن يقرب بدقة مرضية بدلالة درجتي حرارة دخول وخروج المائع من المنظومة:

$$\text{Losses} = U_d\, A_i\,(T_i - T_a) + U_d\, A_o\,(T_o - T_a) \qquad (17.10)$$

حيث: A_o , A_i تمثل المساحات السطحية لأنابيب الدخول والخروج، على التوالي. بإعادة ترتيب المعادلات (14.10) و (17.10)، فإن الفواقد يمكن أن تُصاغ بدلالة الطاقة المفيدة المكتسبة ودرجة حرارة دخول المائع كالتالي:

$$\text{Losses} = U_d\,(A_i + A_o)(T_i - T_a) + \frac{U_d\, A_o\, q_u}{(\dot{m}\,Cp)_c} \qquad (18.10)$$

الانخفاض في درجة الحرارة ΔT_i، نتيجة للفقد الحراري من جانب أنبوب الدخول يمكن تقريبه إلى الصورة التالية:

$$\Delta T_i = \frac{U_d\, A_i\,(T_i - T_a)}{(\dot{m}\,Cp)_c} \qquad (19.10)$$

بتعويض المعادلات (18.10) و (19.10) في المعادلة (15.10)، وبإعادة الترتيب، فان الطاقة المفيدة المكتسبة من منظومة المجمع الشمسي – الأنابيب يمكن صياغتها على الصورة التالية:

$$q_u = \frac{A_c\, F_R\left[H_a - U_c\left(1 - \frac{U_d\, A_i}{(\dot{m}\,Cp)_c} + \frac{U_d\,(A_i + A_o)}{A_c\, F_R\, U_c}\right)(T_i - T_a)\right]}{1 + \frac{U_d\, A_o}{(\dot{m}\,Cp)_c}} \qquad (20.10)$$

يمكن للمعادلة السابقة أن توضع في صورة كتلك التي للطاقة المفيدة المكتسبة في المجمع الشمسي، وبالتالي يجب تعريف قيم جديدة لكل من $(\tau\alpha)$ و U_c، كالتالي:

$$q_u = A_c\ F_R\ \left[H\,(\tau\alpha)' - U_c'\ (T_i - T_a)\right] \qquad (21.10)$$

حيث:

$$\frac{(\tau\alpha)'}{(\tau\alpha)} = \frac{1}{1 + \dfrac{U_d\ A_o}{(\dot{m}\,Cp)_c}} \qquad (22.10)$$

$$\frac{U_c'}{U_c} = \frac{1 - \dfrac{U_d\ A_i}{(\dot{m}\,Cp)_c} + \dfrac{U_d\,(A_i + A_o)}{A_c\,F_R\,U_c}}{1 + \dfrac{U_d\ A_o}{(\dot{m}\,Cp)_c}} \qquad (23.10)$$

تُعين أقطار الأنابيب على أساس تعليمات (ASHRAE, 1989)، (Kreider, Rabl, 1994) بناءً على ضوضاء السريان (أي سرعة مائع التشغيل)، كلفة الأنبوب وقدرة الضخ. وكما هو معلوم فإن كلاً من الضغط Δp وقدرة المضخة (W_p) تنخفض بقوة (الرتبة الخامسة) مع قطر الأنبوب وكما هو مبين في المعادلات (24.10)، بينما تزيد الكلفة تقريباً طردياً مع القطر.

$$W_p = (\Delta p \cdot \dot{m})/(\rho \cdot \eta) \qquad \text{(24.10- أ)}$$

$$\Delta p = f\left(\frac{L}{D_h}\right)\left(\rho\frac{V^2}{2}\right) \qquad \text{(24.10- ب)}$$

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho\dfrac{\pi}{4}D_h^2} \qquad \text{(24.10- جـ)}$$

$$D_h = \frac{4A}{P} \qquad \text{(د -24.10)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.87 \ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7\,D_h} + \frac{2.52}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right) \qquad \text{(هـ -24.10)}$$

حيث: η – كفاءة المضخة؛ ρ – كثافة المائع؛ ε – خشونة السطح الداخلي للأنبوب؛ P – المحيط المبلل للأنبوب؛ $\dot{m}$ – معدل تدفق المائع في الأنبوب؛ L – طول الأنبوب؛ Re – رقم رينولد؛ A – مساحة مقطع الأنبوب.

تبعاً لما أورده (Waller, 1990)، فان الضجيج يحدث بواسطة انتقال التيار المتسارع في الأنابيب المستقيمة، فعلى سبيل المثال يحدث ضجيج خفيف عند تدفق الماء (بدون هواء) في الأنابيب بسرعات تتراوح $10\ m/s$؛ بينما للتآكل إعتبارات أخرى (في الأنابيب النحاسية) بحيث لا تزيد سرعات للماء عن $2\ m/s$؛ فإن (ASHRAE, 1989) تنصح بسرعات لا تتجاوز $1.7\ m/s$ في الأنابيب البلاستيكية. الجدول (1.10) يبين أحجام الأنابيب النحاسية والفولاذية ومعدلات التدفق والسرعات المسموح بها.

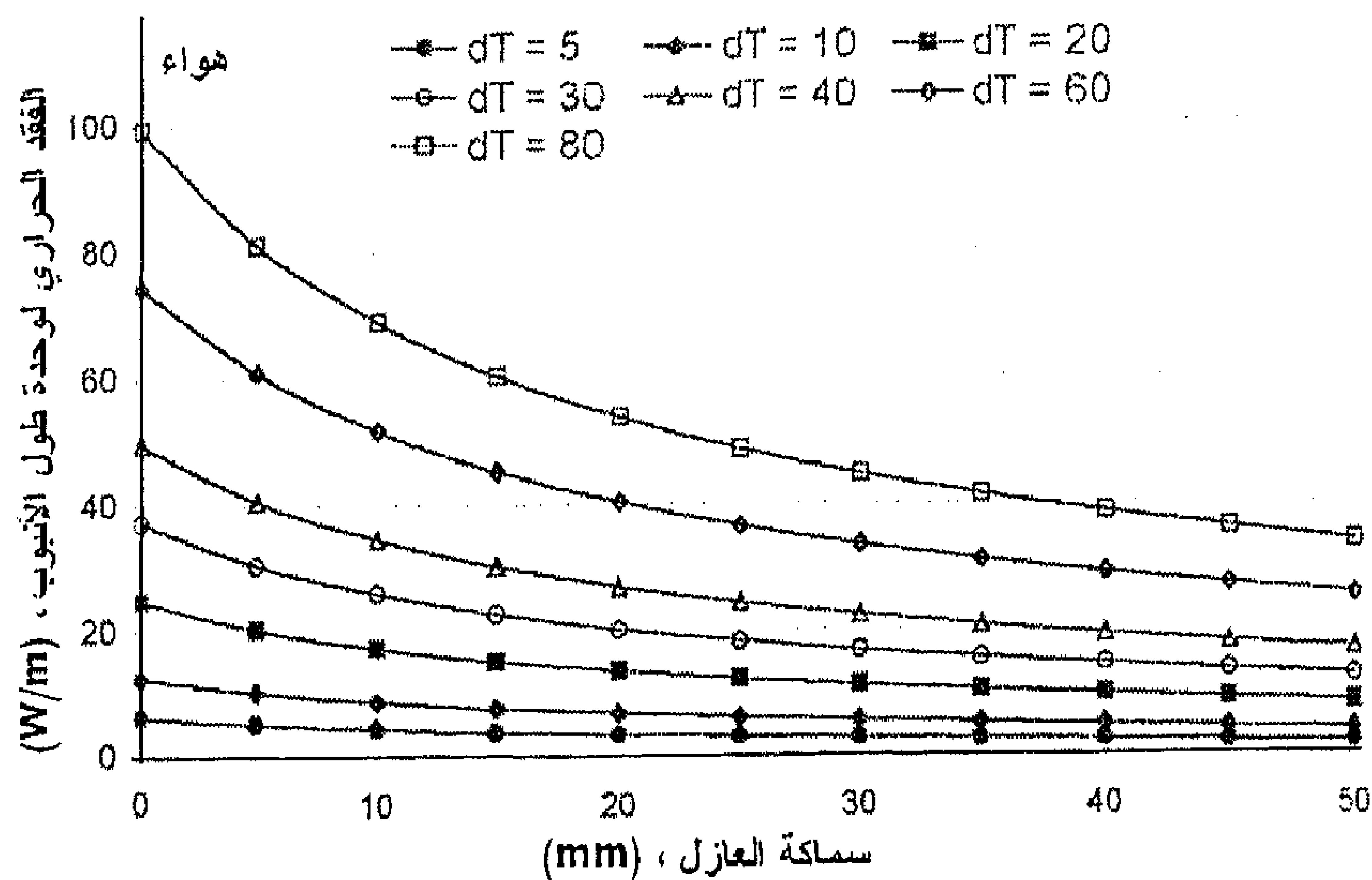
جدول (1.10) أحجام الأنابيب، معدلات التدفق والسرعات المسموح بها في المنشآت الهندسية (Kreider, Rabl, 1994)

حجم الأنبوب الحجم التجاري، in	أنابيب فولاذية: أقل ـ أقصى تدفق $gal/\min$	أنابيب فولاذية: أقل ـ أقصى سرعة ft/s	أنابيب نحاسية: أقل ـ أقصى تدفق $gal/\min$	أنابيب نحاسية: أقل ـ أقصى سرعة ft/s
$\frac{1}{2}$	0-1.8	0-1.9	0-1.5	0-2.1
$\frac{3}{4}$	1.8-4.0	1.1-2.4	1.5-3.5	1.0-2.3
1	4.0-7.2	1.5-2.7	3.5-7.5	1.4-3.0
$1\frac{1}{4}$	7.2-16	1.6-3.5	7-13	1.9-3.5

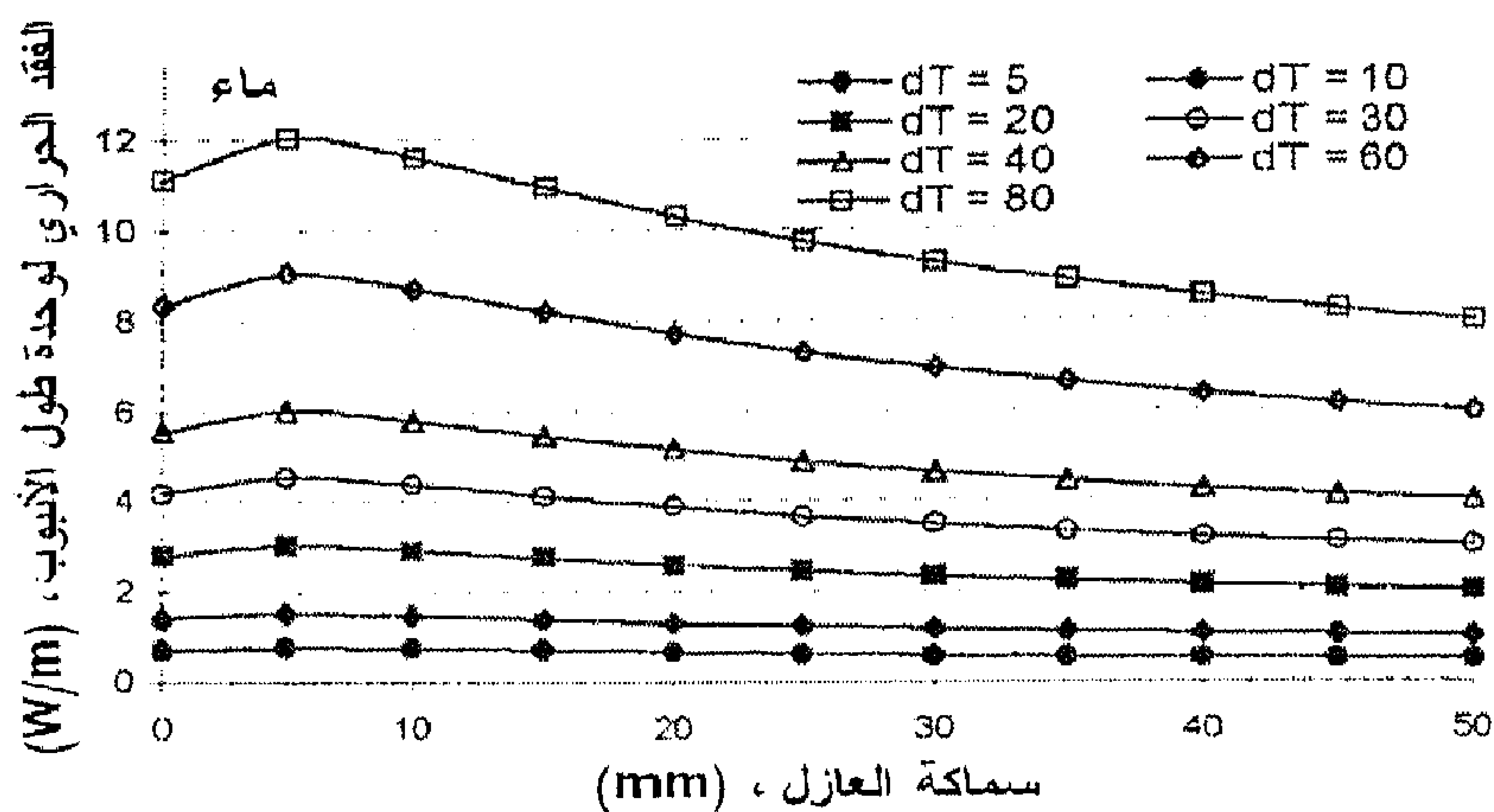
أنابيب نحاسية		أنابيب فولاذية		حجم الأنبوب
أقل ـ أقصى سرعة ft/s	أقل ـ أقصى تدفق gal/min	أقل ـ أقصى سرعة ft/s	أقل ـ أقصى تدفق gal/min	الحجم التجاري، in
2.1-3.6	12-20	2.2-3.7	16-23	$1\frac{1}{2}$
2.4-4.1	20-40	2.3-4.6	23-45	2
2.7-5.1	40-75	2.7-4.7	45-70	$2\frac{1}{2}$
3.0-5.2	65-110	3.0-5.2	70-120	3
3.1-5.4	90-150	3.2-5.4	100-170	$3\frac{1}{2}$
3.5-5.6	130-210	3.5-5.8	140-230	4
-	-	3.7-6.4	230-400	5
-	-	3.8-6.6	340-610	6
-	-	3.8-7.6	600-1200	8
-	-	4.1-7.8	1000-1800	10
–	–	4.3-8.1	2800–1500	12

$gal/\text{min} = 7.57682\times10^{-5}\ m^3/s$ ؛ $ft/s = 0.3048\ m/s$ ؛ $in = 0.0254\ m$.

وفي سبيل تحديد الحجم الأمثل للعازل على طول الأنبوب فيجب معرفة أولاً: فرق درجات الحرارة بين المائع داخل الأنبوب والمحيط؛ ثانياً: كلفة وحدة العازل وأخيراً سعر الطاقة الحرارية المفقودة من الأنابيب. وتكون النقطة التي يكون فيها مجموع كلفة الطاقة المفقودة مع كلفة الزيادة في كمية العزل أقل ما يمكن هي نقطة التصميم الأمثل لكمية العزل. الشكل (6.10) يمثل العلاقة بين الفقد الحراري على وحدة طول الأنبوب وسماكة العازل (أ) للهواء و (ب) للماء، لعدد من فروق درجات الحرارة بين المائع والمحيط $dT = T_f - T_a$. كما يمثل الشكل (7.10) الحجم الأمثل للعازل والذي يقع في النقطة الدنيا من منحنى الكلفة الكلية لمادة العازل وسعر الطاقة الحرارية، (Nassar, 1999).



(أ)



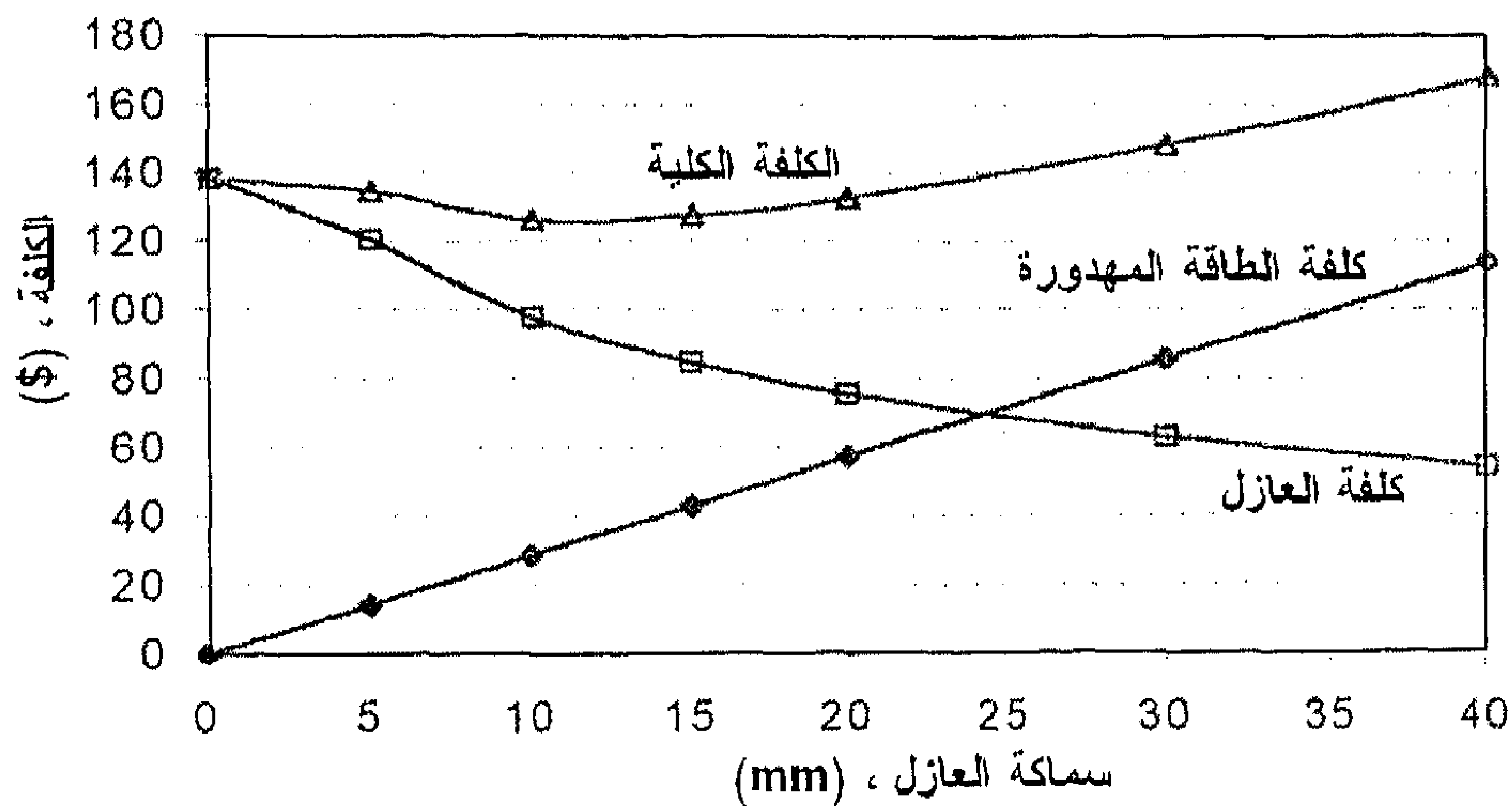
(ب)

شكل (6.10) العلاقة بين الفقد الحراري على وحدة طول الأنبوب وسماكة العازل (أ) للهواء و (ب) للماء، مع تغير فرق درجات الحرارة بين المائع داخل الأنبوب والمحيط dT

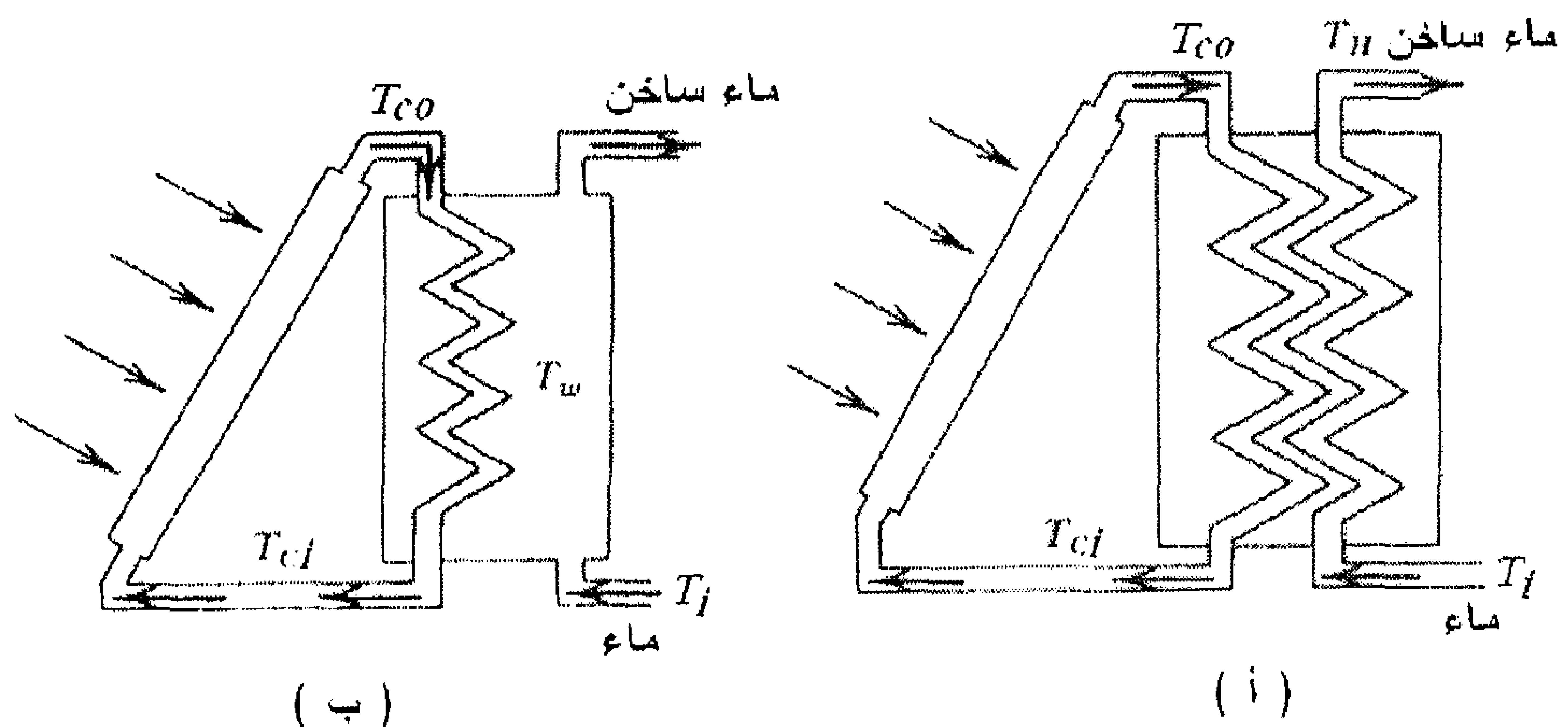
3.2.10 المبادل الحراري

بالرغم من أن استخدام المبادلات الحرارية في المنظومات الشمسية تزيد من كلفة المنظومة وتقلل من الكفاءة الكلية للمنظومة، إلا أن استخدام المبادلات الحرارية بين المجمعات الشمسية والخزان الحراري يسمح باستخدام موائع ومحاليل

في المجمع الشمسي مخالفة عن تلك المستخدمة في دائرة الحمل، على سبيل المثال استخدام الهواء؛ محاليل ضد التجمد وضد الصدأ في منظومات تسخين الماء. الشكل (8.10) يمثل بعض أنظمة تجهيز الماء الساخن المستخدمة للمبادل الحراري والذي يظهر فيها المبادل الحراري كوحدة مستقلة في (أ) وملحق بالخزان الحراري في (ب).



شكل (7.10) الحجم الأمثل للعازل لأنابيب الهواء



شكل (8.10) أنظمة مختلفة لربط المبادل الحراري في المنظومة الشمسية. (أ) مبادل حراري معاكس في دورة مغلقة؛ (ب) مبادل حراري غاطس في الخزان الحراري في دورة مغلقة

يعتبر الدمج في التحليل الرياضي بين المبادل الحراري والمجمع الشمسي من النماذج المهمة في أنظمة الطاقة الشمسية، وقد أشتقت المعادلات مبكراً من قبل العديد من الباحثين (deWinter, 1975)، (Brinkworth, 1975). في هذا النموذج جُمعت معادلة الطاقة المفيدة المكتسبة في المجمع الشمسي مع التبادل الحراري الحاصل بين المائعين في المبادل الحراري. هذه الطريقة تجعل المجمع الشمسي والمبادل الحراري كوحدة واحدة، بطبيعة الحال بإضافة معاملات أخرى غير تلك المعروفة في المعادلات العامة للمجمع والمبادل الحراري. الطاقة المفيدة المكتسبة في المجمع الشمسي مدولة في المعادلتين (1.10)، (2.10) بدلالة T_{ci} ,T_{co}. بينما تُصاغ معادلة أداء المبادل الحراري بدلالة النجاعة ε على الصورة التالية:

$$q_{hx} = \varepsilon \left(\dot{m}Cp\right)_{\min} \left(T_{co} - T_i\right) \tag{25.10}$$

حيث تشير $(\dot{m}Cp)_{\min}$ إلى القيمة الصغرى للمحتوى الحراري للمائع من جهة المجمع الشمسي $(\dot{m}Cp)_c$ ومن جهة الخزان الحراري $(\dot{m}Cp)_t$، T_{co} تمثل درجة حرارة دخول المائع إلى المبادل الحراري من جهة المجمع الشمسي؛ T_i تمثل درجة حرارة دخول المائع إلى المبادل الحراري من جهة الخزان الحراري (والتي تكون قريبة من درجة حرارة قاع الخزان). لمبادل حراري متعاكس التيار وهو النوع الأكثر شيوعاً، تُعطى النجاعة بالمعادلة التالية:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU\left(1-C^*\right)}}{1 - C^* e^{-NTU\left(1-C^*\right)}} \qquad C^* \neq 1 \tag{أ 26.10}$$

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \qquad C^* = 1 \tag{ب 26.10}$$

$$NTU = \left(U\,A\right)/\left(\dot{m}Cp\right)_{\min} \tag{جـ 26.10}$$

$$C^* = (\dot{m}\,Cp)_{\min} / (\dot{m}\,Cp)_{\max} \quad (26.10\ \text{د})$$

لأنواع أخرى من المبادلات الحرارية يجب مراجعة كتب انتقال الحرارة، على سبيل المثال (Kays, London, 1964).

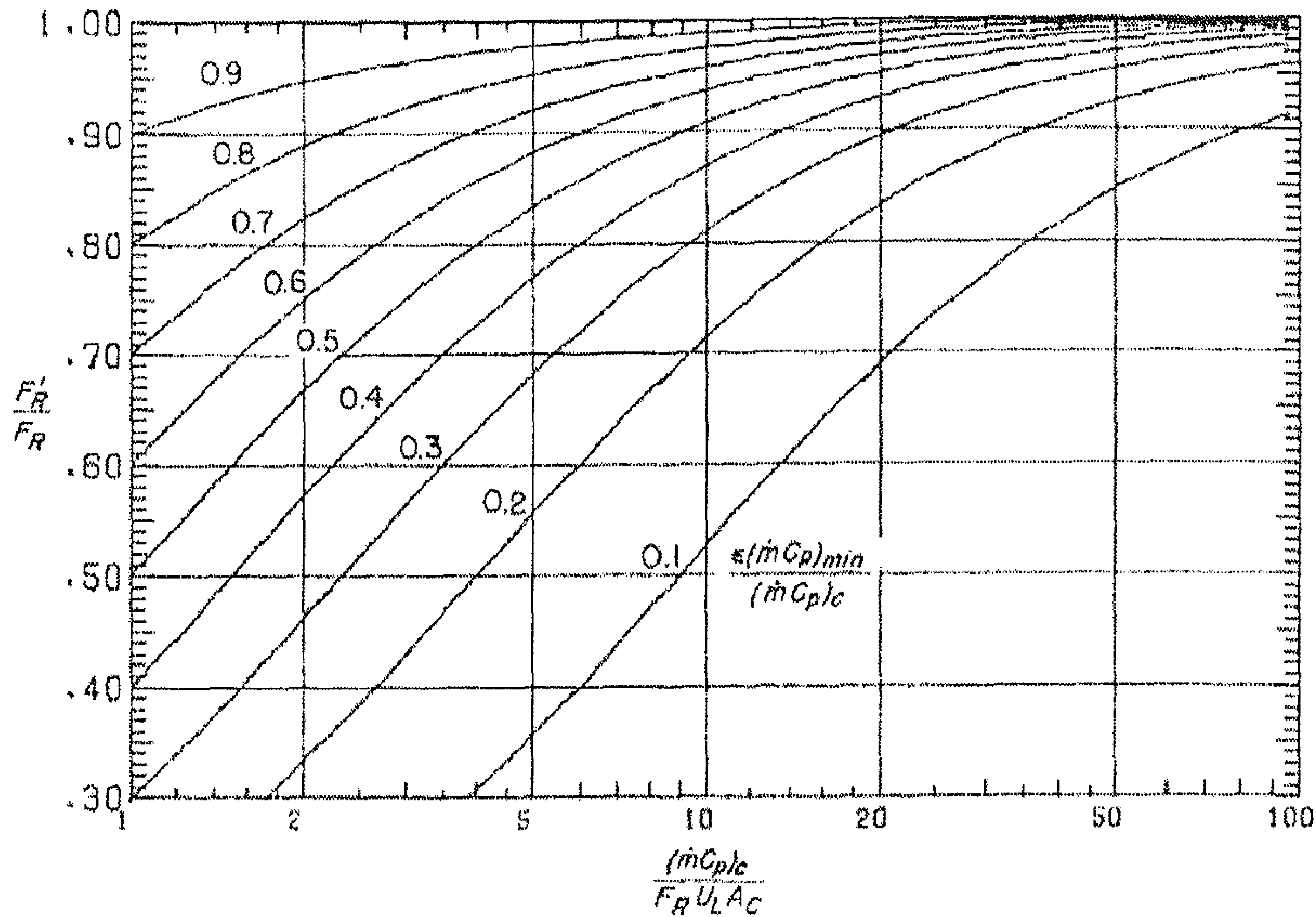
بجمع المعادلتين (1.10) و (2.10) مع المعادلة (23.10)، نحصل على:

$$q_u = A_c\ F_R' \left[H_a - U_c\ (T_{ci} - T_a)\right]^+ \quad (27.10)$$

حيث يمثل معامل الإزاحة الحرارية الكلية ويُعطى بالعلاقة التالية:

$$\frac{F_R'}{F_R} = \left[1 + \left(\frac{A_c\,F_R\,U_c}{(\dot{m}\,Cp)_c}\right)\left(\frac{(\dot{m}\,Cp)_c}{\varepsilon\,(\dot{m}\,Cp)_{\min}} - 1\right)\right]^{-1} \quad (28.10)$$

يعتبر العامل F_R'/F_R مؤشراً للجزاء الواقع على المجمع الشمسي لاستخدامه المبادل الحراري، وذلك لأن المبادل الحراري سيجعل المجمع الشمسي يعمل عند درجات حرارة أعلى مما يكون عليه الحال بدون مبادل حراري. بنظرة أخرى، تمثل النسبة F_R'/F_R الزيادة اللازمة في مساحة المجمعات الشمسية لمنظومة بمبادل حراري لتعويض العجز في الطاقة الناتج من استخدام المبادل الحراري في المنظومة للوصول إلى نفس مستوى الطاقة الناتجة من منظومة بدون مبادل حراري. المعادلة (27.10) تمثل الآن أداء المجموعة المتضمنة المجمع الشمسي مع المبادل الحراري، وهي على نفس الصورة التي لو كان المجمع الشمسي لوحده. يمكن حساب النسبة F_R'/F_R من المعادلة (28.10)، كما يمكن تحديدها أيضاً من الشكل (9.10)، والتي تبين فيه النسبة F_R'/F_R كدالة في $\varepsilon\,(\dot{m}\,Cp)_{\min}/(\dot{m}\,Cp)_c$ و $(\dot{m}\,Cp)_c/A_c\,F_R\,U_c$، (Beckman, et al., 1977).

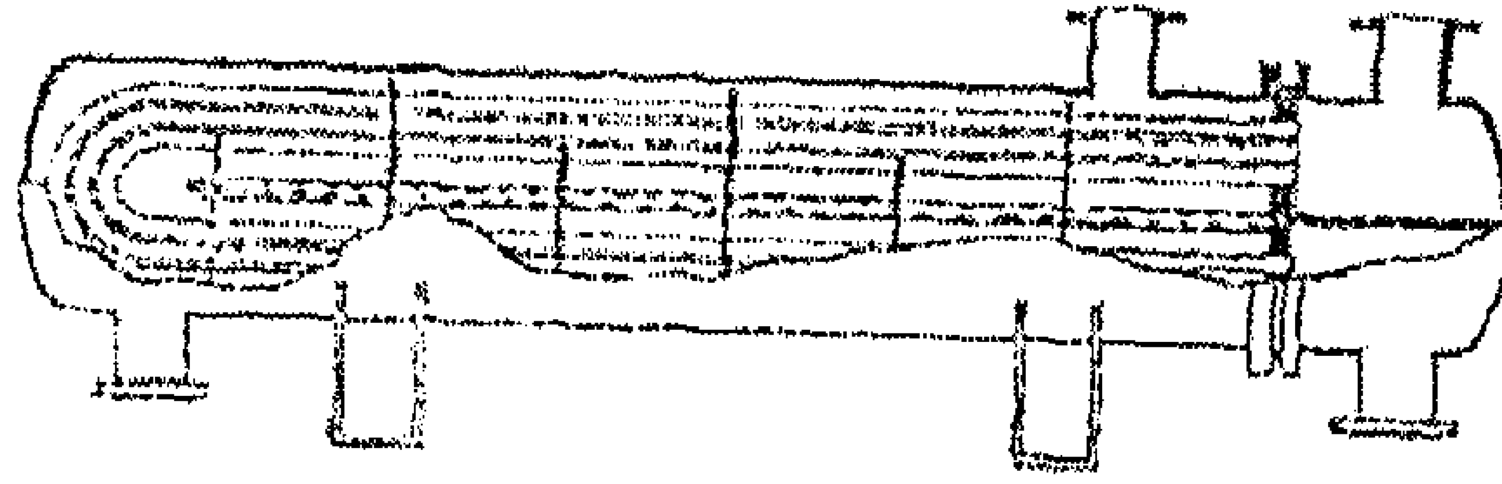


شكل (9.10) معامل تصحيح منظومة المجمع الشمسي ـ المبادل الحراري كدالة في
$(\dot{m}Cp)_c/A_c F_R U_c$ و $\varepsilon(\dot{m}Cp)_{\min}/(\dot{m}Cp)_c$

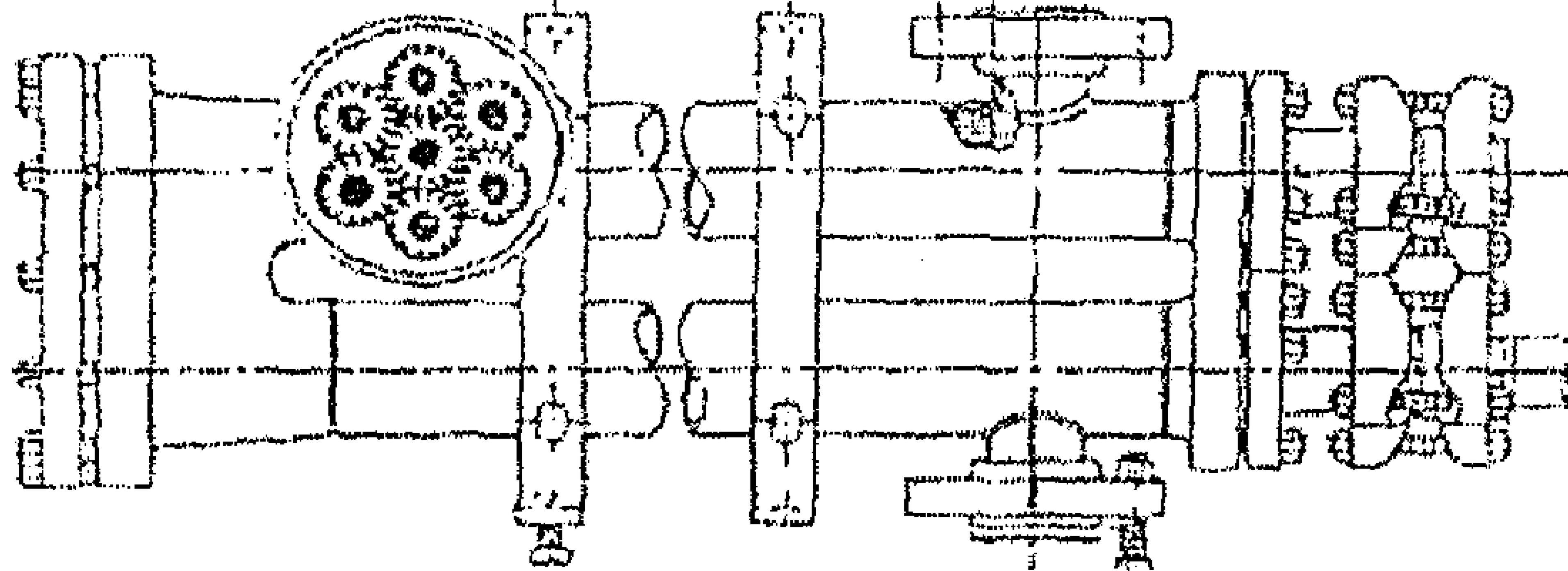
اختيار نوع وحجم المبادل الحراري

هناك العديد من المبادلات الحرارية، ولكن السؤال الذي يطرح نفسه الآن هو؛ أي نوع مناسب للاستخدام في المنظومة الشمسية؟ وما هي أبعاده؟

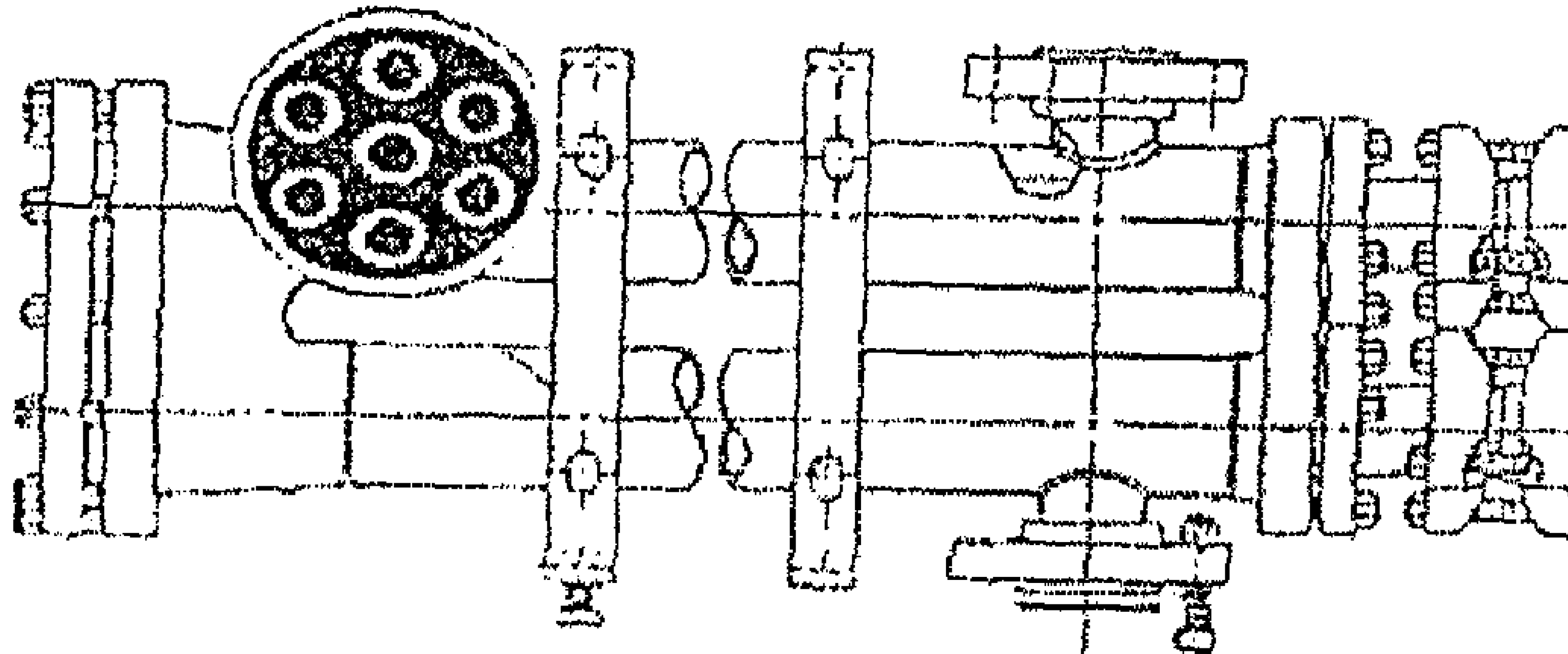
أستحدث (Nassar, 1999) تصنيفاً للمبادلات الحرارية اعتماداً على كلفة إنتاج الطاقة الحرارية من المبادل الحراري لوحدة درجة حرارة $q/\Delta T,\ (W/K)$، حيث قام بدراسة ملائمة استخدام ثلاثة أنواع من المبادلات الحرارية المبينة في الشكل (10.10) في المنظومات الشمسية على أساس المجمعات الهوائية. كلفة إنتاج الطاقة لوحدة درجة الحرارة والمساحة المناظرة لكل نوع من المبادلات الحرارية موضحة في الأشكال (11.10) و (12.10)، على التوالي.



1 – متعدد الأنابيب ثنائي المسار – نوع U أحادي الاطار

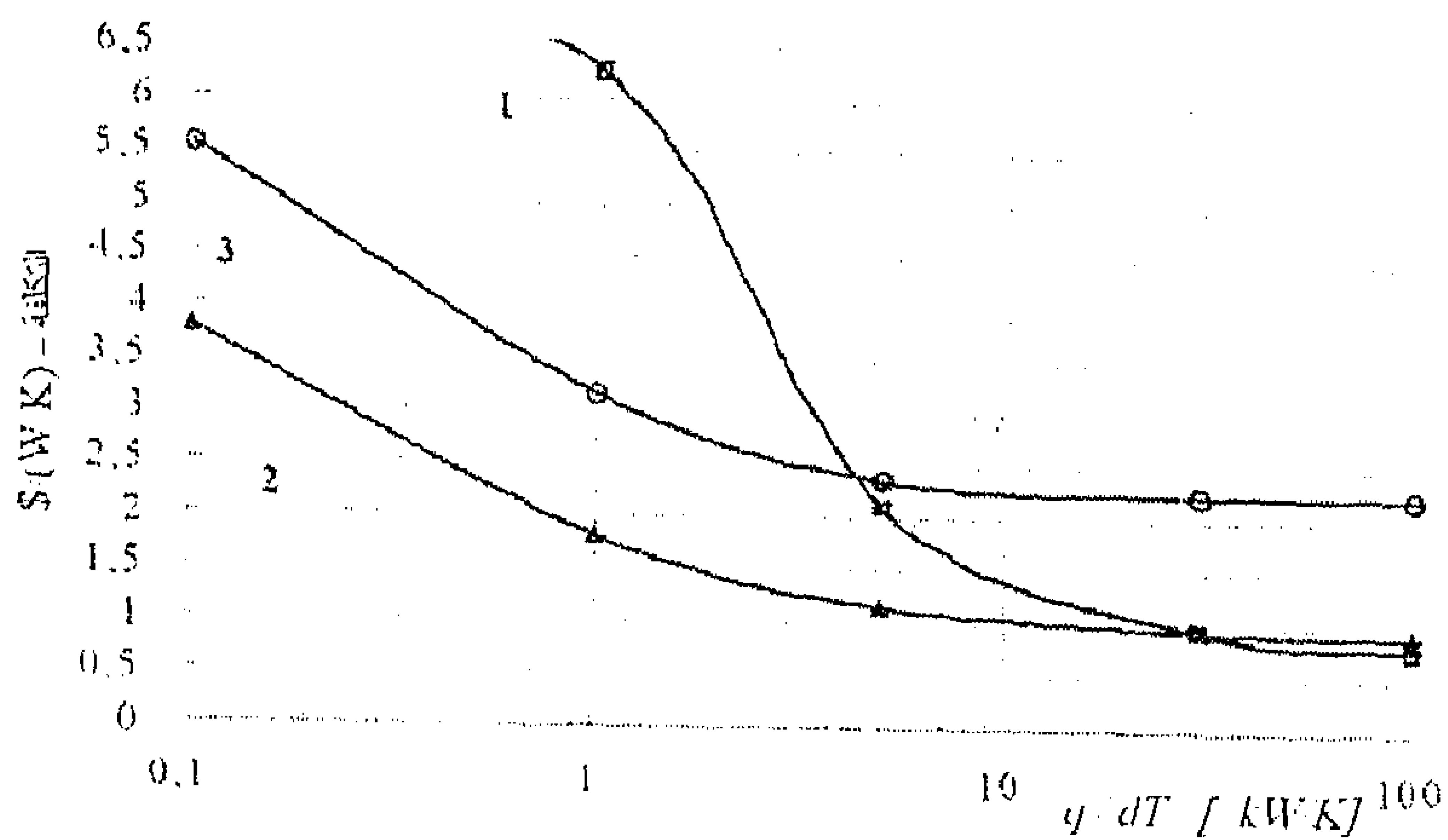


2 – متعدد الأنابيب المزعنفة – ثنائي الاطار

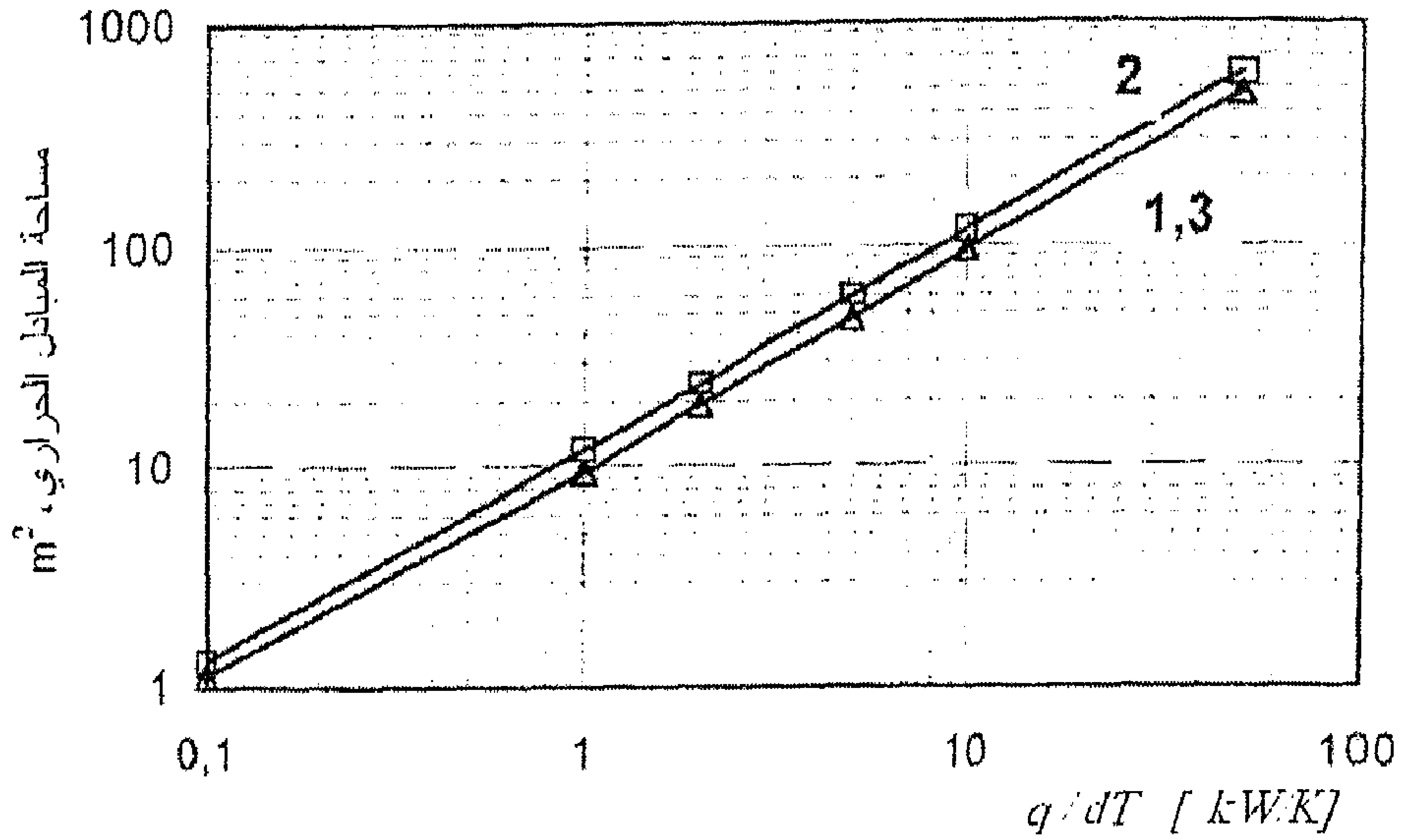


3 – متعدد الأنابيب – ثنائي الاطار

شكل (10.10) أنواع المبادلات الحرارية التي يمكن استخدامها في المنظومات الشمسية



شكل (11.10) كلفة إنتاج الطاقة لوحدة درجة الحرارة لكل نوع من المبادلات الحرارية الثلاثة



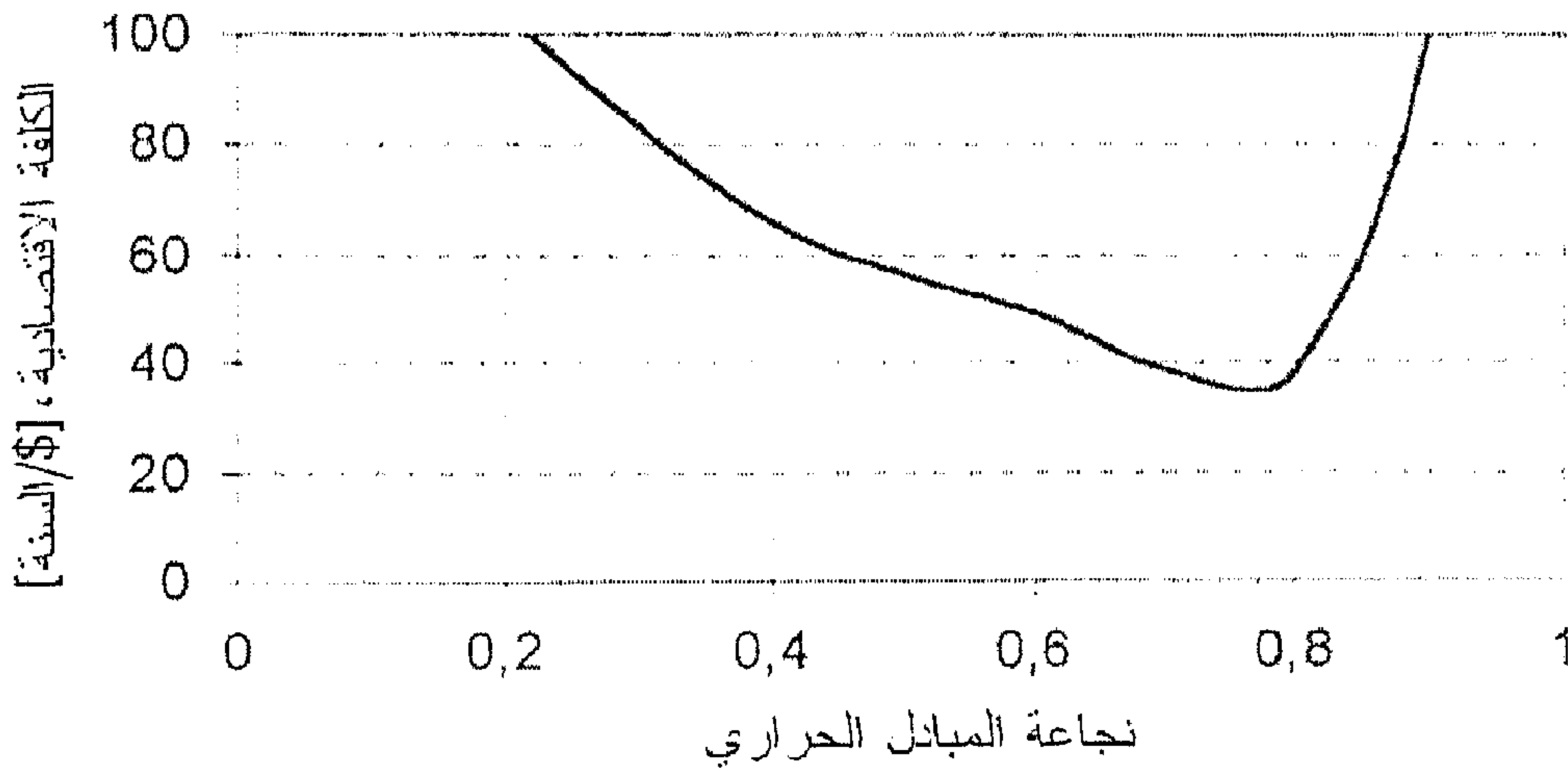
شكل (12.10) مساحة المبادل الحراري اللازمة لإنتاج الطاقة لوحدة درجة الحرارة للأنواع الثلاثة

للمنظومات الهوائية، وبالرغم من أن المبادل الحراري الثاني (نوع الأنابيب المزعنفة) أغلى سعراً وبمساحة أكبر كما هو مبين في الشكل (12.10) إلا أن إنتاج الطاقة منه سيكون أقل كلفة من باقي الأنواع، وبهذا يمكن اختيار النوع الثاني كعنصر في المنظومة الشمسية الهوائية.

إلا أن كفاءة المنظومة الشمسية لا تعتمد فقط على حجم ونوع المبادل الحراري فقط، وإنما وبدرجة عالية على نجاعته ε، وأيضاً على المحتوى الحراري للموائع من جهة المجمع الشمسي $(\dot{m}Cp)_c$ ومن جهة الخزان الحراري $(\dot{m}Cp)_t$. ولإيجاد النجاعة المثالية للمبادل الحراري يجب إجراء محاكاة للمنظومة كاملة والحصول على سعر الطاقة المتحصل عليها من المنظومة الشمسية كدالة في نجاعة المبادل الحراري، كما هو مبين في الشكل (13.10)، (Nassar, 1999). وكذا الحال بالنسبة للمحتوى الحراري، حيث أشارت الدراسة نفسها على أن سلوك المنظومة الشمسية يعتمد على المحتوى الحراري للموائع وليس على معدل التدفق بصورة مباشرة.

مثال 1.10

استخدم مجمع شمسي في منظومة شمسية كتلك المبينة في شكل (2.10) لتسخن محلول ضد التجمد، تنتقل الحرارة بعدها إلى الماء عن طريق مبادل حراري. بحيث كان للمجمع $F_R U_c$ يساوي $3.75\ W/m^2.C$. وكان معدل تدفق المائعين في المبادل الحراري $0.0139\ kg/s$ على وحدة مساحة المجمع. وكانت السعة الحرارية للمحلول في المجمع الشمسي $Cp = 3350\ J/kg.C$. نجاعة المبادل الحراري $\varepsilon = 0.7$. احسب F_R'/F_R.



شكل (13.10) الكلفة الاقتصادية لنجاعة المبادل الحراري للنوع الثاني لمنظومة شمسية هوائية

الحل:

المحتوى الحراري على وحدة مساحة المجمع الشمسي للماء من جهة الخزان الحراري ـ المبادل الحراري تساوي $0.0139\times4190 = 58.2\ W/m^2.C$. ومن جهة المجمع الشمسي ـ المبادل الحراري تساوي $0.0139\times3350 = 46.6\ W/m^2.C$. وبهذا القيمة الدنيا لحاصل ضرب $(\dot{m}\,Cp)$ هي للمحلول المضاد للتجمد، $\varepsilon\left(\dot{m}\,Cp\right)_{\min}/\left(\dot{m}\,Cp\right)_c = \varepsilon = 0.7$، تبعاً:

$$\frac{(\dot{m}\,Cp)_c}{A_c\,F_R\,U_c} = \frac{0.0139 \times 3350}{3.75} = 12.4$$

من المعادلة (27.10) أو من الشكل (9.10) نحصل على:

$$F'_R / F_R = 0.97 \qquad \triangleleft$$

هذا يعني أنه يجب زيادة مساحة المجمعات الشمسية بنسبة 3% لتعويض العجز في الطاقة عند استخدام المبادل الحراري في المنظومة الشمسية.

مثال 2.10

إحسب الجزاء المفروض على منظومة شمسية لاستخدامها مبادل حراري بعدة قيم للنجاعة من 0.2 إلى 0.99. قارن كلفة الجزاء على الطاقة المتحصل عليها من المنظومة مع سعر المبادل الحراري. إذا كانت الكلفة السنوية لوحدة مساحة المبادل الحراري تساوي $6\$/m_{hx}^2$. فإذا كانت كلفة الجزاء، تمثل تكلفة الطاقة الإضافية التقليدية (الغير شمسية) اللازمة لتعويض العجز الناتج في الطاقة من استعمال المبادل الحراري. أعتبر سعر الطاقة الإضافية التقليدية (الغير شمسية) تساوي $10\$/GJ$. مواصفات المنظومة مدرجة أدناه (المائع العامل هو الماء).

مساحة المجمعات الشمسية تساوي $A_c = 100 m^2$ ؛

المحتوى الحراري للمائع تساوي

$$(\dot{m}\,Cp)_{\min} = (\dot{m}\,Cp)_{\max} = 50\,kg/hr.m_c^2 \times 4182\,J/kg.K$$ ؛

الطاقة المنتجة من المنظومة بدون مبادل حراري تساوي $200 MJ/m_c^2.yr$ ؛

$$F_R\,U_c = 5\,W/m_c^2.C = 5 \times 3600\ \ J/hr.m_c^2.C$$ ؛

$$U_{hx} = 1400\,W/m_c^2.C$$

الحل:

معادلة معامل جزاء استخدام المبادل الحراري عند تساوي معدل تدفق التيارين تصبح على الصورة التالية:

$$\frac{F'_R}{F_R} = \frac{1}{1+0.0861(1/\varepsilon-1)}$$

وبهذا تصبح الطاقة السنوية المنتجة من المنظومة الشمسية باستعمال المبادل الحراري:

$$q_u = F'_R/F_R \times A_c \times 200\,MJ/m_c^2.yr$$

الطاقة الإضافية التقليدية الغير شمسية اللازمة لتعويض العجز في الطاقة نتيجة استعمال المبادل الحراري تُعطى:

$$q_a = (1-F'_R/F_R)\times A_c \times 200\,MJ/m_c^2.yr$$

ولإيجاد مساحة المبادل الحراري (المتعاكس التيار) نستخدم المعادلات (25.10) بدلالة NTU.

نتائج المعادلات السالفة الذكر مدرجة في الجدول التالي:

القيمة الاقتصادية للطاقة باستخدام المبادل الحراري:

$$C_a = q_a\,c_a$$

مساحة المبادل الحراري $A_{hx}\left(m_{hx}^2\right)$	NTU	الطاقة المنتجة $q_u\ (GJ/yr)$	معامل الجزاء F'_R/F_R	النجاعة ε
1.04	0.25	14.88	0.744	0.2
2.07	0.50	17.06	0.853	0.3
4.15	1.00	18.42	0.921	0.5
6.22	1.50	18.92	0.946	0.6
9.75	2.33	19.28	0.964	0.7
16.60	4.00	19.58	0.979	0.8
37.34	9.00	19.82	0.991	0.9
411.00	99.00	19.98	0.999	0.99

حيث c_a تمثل كلفة الطاقة الإضافية التقليدية بوحدات $\$/GJ$. كلفة مساحة المبادل الحراري تُعطى:

$$C_{hx} = A_{hx}\, c_{hx}$$

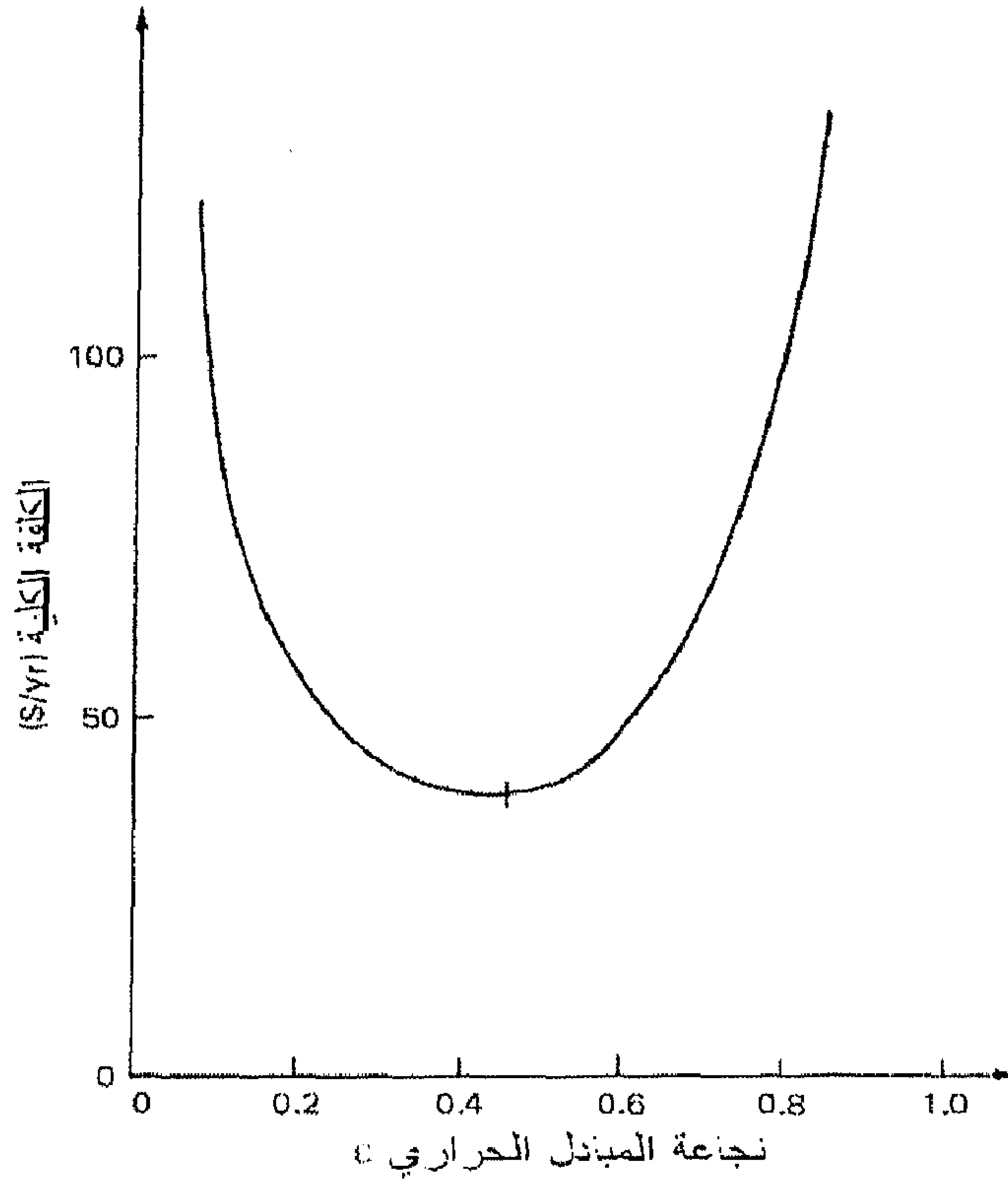
حيث c_{hx} تمثل السعر السنوي لوحدة مساحة المبادل الحراري بوحدات $\$/m_{hx}^2.yr$.

تبين نتائج هذا المثال أنه لتحسين نجاعة المبادل الحراري يجب زيادة مساحته، وهذه الزيادة تكون سريعة. إذن كلفة المبادل الحراري تكون عالية للحصول على تحسين بسيط في الطاقة المنتجة من المنظومة الشمسية، قيمة هذه الزيادة نسبياً بسيطة مقارنة مع زيادة تكلفة المبادل الحراري. لذا لا يوجد مردود مادي من إنتاج هذه الزيادة في الطاقة. وبالمثل، فان للمبادلات الحرارية الصغيرة جزاء كبير على الطاقة، والتي تكون قيمتها أعلى من تلك المدفوعة على الوقود التقليدي. ولكنه من الممكن أن يكون هناك مردود اقتصادي لإضافة مساحة المبادل الحراري لتغطية جزء وليس كل الطاقة الشمسية المطلوبة.

يمثل الشكل (14.10) الكلفة الإضافية الكلية لإمداد الحمل الكلي $20GJ/yr$. هذه الكلفة الإضافية مطلوبة لتصميم المبادل الحراري الذي سيستخدم في المنظومة، وتضاف هذه الزيادة على السعر الأساسي للمنظومة الشمسية. كما هو مبين في الشكل، فان النجاعة المثالية للحصول على أقل سعر سنوي للمبادل الحراري في المنظومة حوالي 0.46. نود الإشارة هنا، إلى أن هذا المثال يأخذ بعين الاعتبار عنصر واحد في المنظومة الشمسية، وللحصول على التصميم الأمثل للمبادل الحراري لكل المنظومة، يجب إجراء محاكاة شاملة لكافة عناصر المنظومة.

جدول الحسابات الاقتصادية للمثال 2.10

الكلفة الكلية $(\$/yr)$	كلفة مساحة المبادل الحراري C_{hx} $(\$/yr)$	القيمة المالية للجزاء C_a $(\$/yr)$	الطاقة الاضافية الغير شمسية q_a (GJ/yr)	النجاعة ε
57.44	6.24	51.20	5.12	0.2
41.82	12.42	29.40	2.94	0.3
40.70	24.90	15.80	1.58	0.5
48.12	37.32	10.80	1.08	0.6
65.70	58.50	7.20	0.72	0.7
103.80	99.60	4.20	0.42	0.8
225.85	224.04	1.80	0.18	0.9
2466.20	2466.00	0.20	0.02	0.99



شكل (14.10) التكلفة الكلية للمبادل الحراري و الجزاء عن الزيادة في الطاقة الغير شمسية للمثال 2.10. أقل كلفة لنجاعة المبادل الحراري عند 0.46

4.2.10 الخزان الحراري

يمثل الخزان الحراري أيضاً كلفة وتعقيد إضافي على المنظومات الشمسية الحرارية، إلا أنه غالباً ما يتطلب الأمر إلى استخدام هذا الجهاز لتخفيض التذبذب في الطاقة الشمسية المجمعة من خلال المنظومة الشمسية والحمل المطلوب. وغالباً ما تكون الخزانات الحرارية جيدة العزل بحيث لا يتجاوز مقدار الفقد الحراري 2% من الطاقة المخزونة للوصول إلى النجاعة الاقتصادية من الخزانات الحرارية. ويؤثر سلوك الخزان الحراري كثيراً على السلوك الكلي للمنظومة الشمسية وبالتالي فإن طريقة ربط الخزان الحراري مع المنظومة الشمسية تعتبر من أهم تقنيات إنتاج الطاقة وكذلك الحال يعتبر حجم الخزان الحراري ومعدل التدفق من الخزان إلى المنظومة الشمسية من العوامل المهمة التي تؤثر على التحليلات الاقتصادية للمنظومة.

أما عن تأثير حجم الخزان على أداء المنظومة الشمسية، فالمثال التالي يشرح ذلك بوضوح.

مثال 3.10

في يوم مشمس، كانت الطاقة المنتجة من منظومة شمسية دالة في الزمن، وأقصى قيمة لها عند الزوال وأقل قيمة كانت عند فترتي الشروق والغروب. فإذا كانت الطاقة المطلوبة من المنظومة الشمسية الحرارية ثابتة بمقدار L_o، احسب درجات حرارة الماء في الخزان ليوم كامل.

الحل:

إذا فرضنا أن الطاقة المفيدة المنتجة في المجمعات الشمسية تُعطى بالعلاقة:

$$q_u = q_{uo} \sin \frac{\pi t}{\tau} \qquad (29.10)$$

حيث: q_{uo} تمثل أقصى قيمة لمعدل الطاقة المنتجة، τ هي طول اليوم، t يمثل الزمن من شروق الشمس إلى غروبها.

وبالتالي فإن اتزان الطاقة في وحدة الخزن الحراري، يمكن صياغتها على الصورة:

$$(mCp)_s \frac{dT}{dt} = q_u - L_o \tag{30.10}$$

حيث: تمثل $(mCp)_s$ السعة الحرارية للخزان kJ/kg، T_s تمثل درجة حرارة الخزان. المعادلة (30.10) تهمل الفقد الحراري من الخزان والتي يمكن أن تكون صغيرة جداً وذلك عن طريق استخدام العزل الجيد.

يمكن حل المعادلة (30.10) للحصول على $t_s(t)$، وذلك بعد التعويض عن q_u من المعادلة (29.10) في المعادلة (30.10):

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{1}{(mCp)_s}\left(q_{uo}\sin\frac{\pi t}{\tau} - L_o\right) \tag{31.10}$$

بتكامل المعادلة (31.10)، نحصل على:

$$T_s = T_{so} - \frac{1}{(mCp)_s}\left(\frac{\tau}{\pi} q_{uo} \cos\frac{\pi t}{\tau}\Big|_0^t + L_o t\right)$$

$$T_s = T_{so} - \frac{1}{(mCp)_s}\left(L_o t - \frac{2\tau q_{uo}}{\pi}\sin^2\frac{\pi t}{2\tau}\right) \tag{32.10}$$

حيث: $t \le \tau$ و $T_{so} = T_s(t=0)$.

المعادلة (32.10) تبين أن الزيادة في السعة الحرارية للخزان $(mCp)_s$ تقلل التذبذب في درجات الحرارة في الخزان.

العديد من المتغيرات تحدد حجم الخزان الحراري، الجدول (2.10) يشير إلى أحجام الخزان الحراري التي ينصح بها، اعتماداً على الطاقة المطلوبة للمبنى.

جدول (2.10) علاقة الحمل الحراري للمبنى مع حجم الخزان الحراري المائي، (Kut, Hare, 1983)

متوسط الطاقة المطلوبة للمبنى (kW)	أقل سعة للخزان الحراري باللتر				
	خزن لمدة 10 ساعة	خزن لمدة 20 ساعة	خزن لمدة 30 ساعة	خزن لمدة 40 ساعة	خزن لمدة 50 ساعة
معامل الضرب	1.0	2.1	3.2	4.3	5.4
14.7	4546	9547	14547	19548	24548
29.3	9092	19093	28185	39096	49097
44	13638	28640	42278	58643	73645
58.6	18184	38186	56370	72191	89194
73.3	22730	47733	70463	97737	122742
88	272276	57280	84556	117287	147290
102.6	31822	66826	98648	136835	171839
117.2	36368	76373	112740	156382	196387
132	40914	85919	126833	175930	220936
146.6	45460	95466	140926	195478	245484

5.2.10 أجهزة التحكم

لتحقيق الأداء الأمثال لعمليات التسخين بالطاقة الشمسية، فإنه يجب استخدام أجهزة التحكم الآلي. في الحالة الطبيعية، فمنظومة التزويد بالمياه الساخنة الشمسية لا يجب أن تعمل إلا في حالة توفر الطاقة الشمسية، عندها يجب أن تعمل المنظومة بنجاعة عالية ويجب أن تكون قادرة على حماية نفسها من التجمد ومن التسخين العالي. وتقع أجهزة التحكم الآلي ضمن مجموعتين أساسيتين هما:

أ) أجهزة تحكم ذاتية التشغيل (بمعنى أن جهاز التحكم يعمل بدون تيار كهربائي).

ب) أجهزة تحكم كهربائية.

وغالباً ما تفضل أجهزة التحكم الذاتية التشغيل، حيث لا ضرورة لإيجاد مصدر إضافي للطاقة لتشغيل جهاز التحكم وبالتالي تنخفض كلفة التشغيل (Kut, Hare, 1983).

التصنيف الأخر لأجهزة التحكم والذي يتضمن نوعين شائعي الاستخدام في المجمعات الشمسية على مستوى التطبيقات المنزلية وهما على أساس التحكم في سرعة دوران المضخة وبالتالي التحكم في معدل تدفق المائع خلال المنظومة، وهما:

أ) أجهزة تحكم ذات سرعة ثابتة.

ب) أجهزة تحكم ذات سرعات متغيرة.

في أجهزة التحكم ذات السرعة الثابتة، يُتخذ القرار بتشغيل المضخات أو بإغلاقها اعتماداً على ما إذا كانت هناك طاقة مفيدة مكتسبة من المجمعات الشمسية أم لا. أما بالنسبة لأجهزة التحكم ذات السرعات المتغيرة، فإنه يحدث تغيير في سرعة دورات المضخة محاولاً بذلك الحفاظ على مستوى معين من درجة حرارة خروج المائع من المجمع الشمسي. كلتا الاستراتيجيتين لهما ميزاتها وعيوبها، وتعتمد بصورة كبيرة على نوع تطبيق المنظومات الشمسية. الشكل (15.10) يبين نموذجاً من أجهزة التحكم ذات السرعة الثابتة لمنظومة حرارية شمسية.

تحتاج معظم أجهزة التحكم إلى مجسين لدرجات الحرارة. يوضع الأول في قاع وحدة الخزن الحرارة، بينما يوضع الثاني على سطح الصفيحة الماصة عند المخرج في المجمع الشمسي (أو على سطح الأنبوب القريب من الصفيحة). وفي حالة ما إذا كانت السعة الحرارية للمجمع صغيرة، فإنه وعندما يمر المائع من خلال المجمع فإن المجس يستشعر درجة حرارة خروج المائع من المجمع الشمسي. وعند عدم وجود سريان للمائع، فإن المجس يشير إلى درجة حرارة الصفيحة الماصة للمجمع T_p. يستقبل جهاز التحكم الإشارة القادمة من المجسات في المجمع الحراري وفي الخزان

الحراري. فإذا كانت درجة حرارة الخزان تساوي T_i، وعند دوران المضخة فإن درجة حرارة دخول المائع إلى المجمع الشمسي ستكون مساوية لتلك في قاع الخزان الحراري (إذا ما اعتبرنا أن الأنابيب جيدة العزل ولا تفقد الحرارة من خلالها). فحيثما كانت درجة حرارة الصفيحة – عند عدم وجود سريان – أكبر من T_i بقدر معين ΔT_{on} فسيقوم جهاز التحكم بإعطاء إشارة للمضخة للعمل. وعندما تدور المضخة فإن فرق درجات الحرارة سوف يهبط إلى حد يساوي ΔT_{off}، وسيقوم جهاز التحكم بقطع التيار الكهربائي عن المضخة وتتوقف عن العمل. ولذا يجب عند برمجة جهاز التحكم مراعاة وجود فاصل زمني بين ΔT_{on} و ΔT_{off} حتى نتحاشى تشغيل وقطع المضخة عند فترات زمنية متقاربة جداً.

عندما تكون مضخة المجمع الشمسي مغلقة، فإن الطاقة المفيدة تساوي صفراً، ودرجة حرارة الصفيحة تُعطى بالعلاقة التالية:

$$\left[H_a - U_c\left(T_p - T_a\right)\right] = 0 \qquad (33.10)$$

وبهذا فإن قيمة H_a عندما تكون T_p مساوية $T_i + \Delta T_{on}$ هي:

$$H_{a,on} = U_c\left(T_i + \Delta T_{on} - T_a\right) \qquad (34.10)$$

وعندما تعمل المضخة، فإن الطاقة المفيدة المكتسبة من المجمع تكون:

$$q_u = A_c\, F_R\left[H_a - U_c\left(T_i - T_a\right)\right] \qquad (35.10)$$

والتي عندما نعوض المعادلة (34.10) فيها نحصل على:

$$q_u = A_c\, F_R\, U_c\, \Delta T_{on} \qquad (36.10)$$

ودرجة حرارة خروج المائع من المجمع الشمسي تحت هذه الظروف تكون:

$$q_u = \left(\dot{m}\, Cp\right)\left(T_o - T_i\right) \qquad (37.10)$$

وتُقاس $(T_o - T_i)$ بواسطة جهاز التحكم بعد أن يبدأ المائع بالتدفق خلال المجمع. وبالتالي فإن شرط إغلاق المضخة يجب أن يحقق الشروط التالية:

أ) في حالة عدم وجود مبادل حراري:

$$\Delta T_{off} \leq \frac{A_c\, F_R\, U_c}{(\dot{m}\, Cp)} \Delta T_{on} \qquad (38.10)$$

ب) في حالة وجود مبادل حراري:

$$\Delta T_{off} \leq \frac{A_c\, F_R\, U_c}{\varepsilon(\dot{m}\, Cp)_{\min}} \Delta T_{on} \qquad (39.10)$$

مثال 4.10

مجمع شمسي مائي مستوي بالمواصفات الحرارية التالية: $A_c = 2\, m^2$، $F_R\, U_c = 3\, W/m^2\, C$، $\dot{m} = 0.03\; kg/s$. ما هي نسبة تشغيل المضخة إلى إغلاقها؟

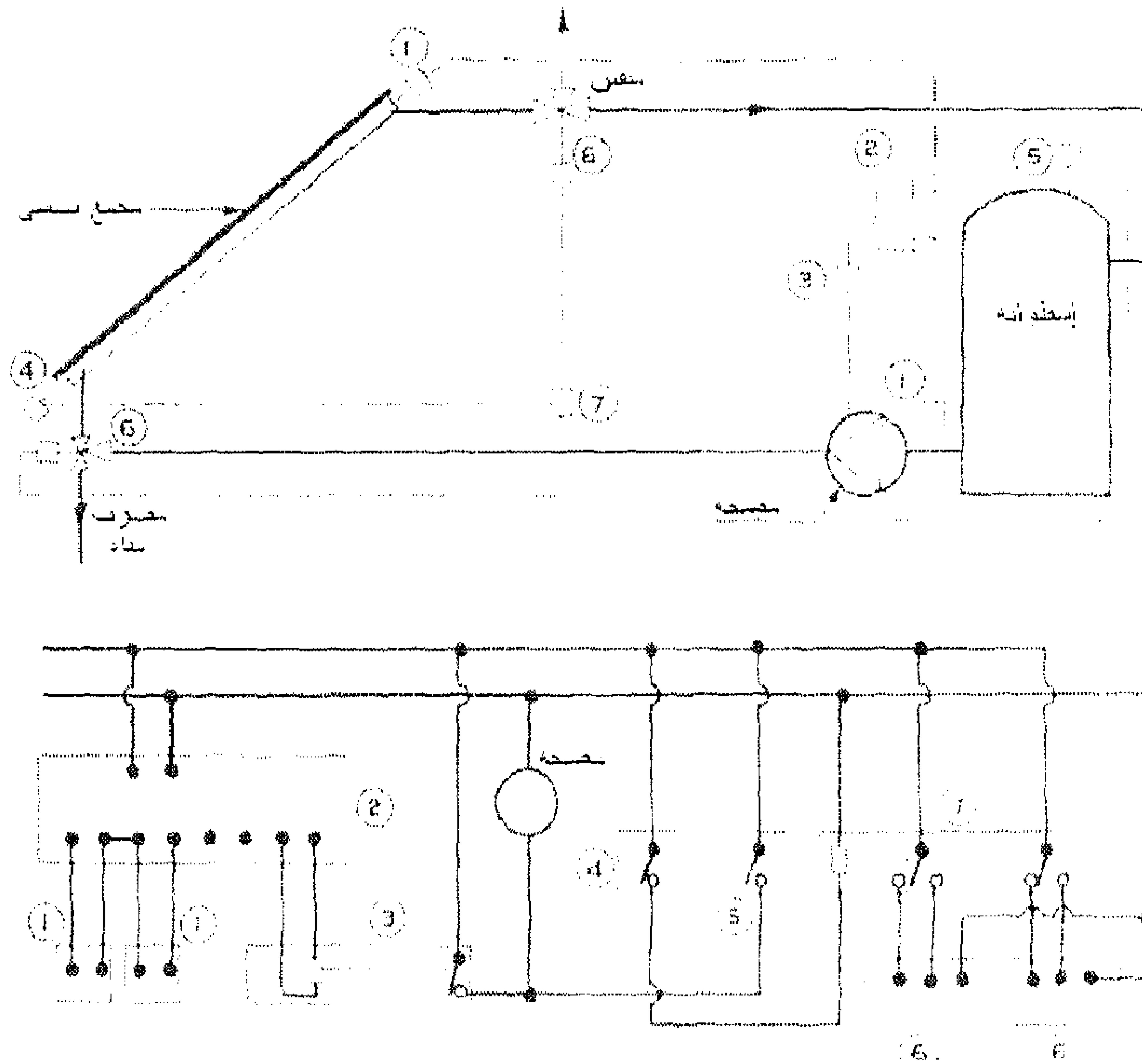
الحل:

من المعادلة (38.10) نحصل على:

$$\frac{\Delta T_{on}}{\Delta T_{off}} \geq \frac{0.03 \times 41990}{2 \times 3} = 21 \qquad \triangleleft$$

يتضح من المثال السابق أن شرط تشغيل المضخة يجب أن يكون أكبر من شرط إغلاق المضخة. وبنظرة أخرى على الموضوع، فإنه إذا تم فرض $5^\circ C$ لتشغيل المضخة، فان جهاز التحكم سيتحسس فرق درجات حرارة حوالي $0.25^\circ C$، وهذه درجة حرارة قليلة وستقوم المضخة بالتشغيل والإغلاق لأقل تغير في شدة الإشعاع الشمسي وهذا الإجراء سيضر بالمضخة. وبزيادة درجة حرارة تشغيل المضخة إلى $20^\circ C$ أو أكثر فسيصبح الوضع أكثر ملائمة، بالإضافة إلى أنه لن يقلل الطاقة المفيدة بشدة. وفي الحقيقة، فإنه لا يجب تشغيل المضخة حتى تكون قيمة الطاقة المفيدة تفوق كلفة تشغيل المضخة.

أما أجهزة التحكم المتغيرة السرعة، فإنها تُستخدم للمحافظة على درجة حرارة خروج المائع من المجمع الشمسي عند درجة حرارة معينة أو لزيادة درجة حرارة المجمع إلى القيمة المحددة. في مثل هذه المنظومات فان مجسات درجات الحرارة تُستخدم للتحكم في سرعة دوران المضخة. إضافة إلى أنه يمكن الحصول على درجات حرارة عالية من هذه الأنظمة من تلك في أجهزة التحكم الثابتة السرعة، وذلك نظراً لمقدرتها على التحكم في معدل تدفق المائع من خلال المجمع الشمسي. في حالة وجود خزان طبائقي (متدرج درجات الحرارة)، فإن التقليل من معدل التدفق الناتج من استخدام أجهزة التحكم هذه يمكن أن يحسن من أداء المنظومة .(Duffie, Beckman, 1991)



شكل (15.10) مخطط لدائرة تحكم ثابتة السرعة لمنظومة شمسية مع حماية من التجمد.
(1) مجسات درجة الحرارة؛ (2) وحدة التحكم؛ (3) مفتاح منظم؛ (4) ترموستات للتجمد؛ (5) ترموستات للغليان؛ (6) صمام؛ (7) مفتاح منظم

6.2.10 منظومة الطاقة الإضافية

للمحافظة على درجة عالية من اعتمادية المنظومات الشمسية وصولاً إلى تغطية كل الحمل المطلوب من المنظومة، وجب تزويد المنظومة بأحجام كبيرة من المجمعات الشمسية ووحدة خزن الطاقة الحرارية، مما يرفع من كلفة المنظومة بالإضافة إلى وجود فائض كبير في الطاقة في فصل الصيف، مما يجعل هذا الإجراء غير اقتصادي البتة. ولهذا يجب تزويد المنظومات الشمسية (وكذا الحال في جميع منظومات الطاقة البديلة) بمنظومة طاقة إضافية تقوم بتعويض العجز في الطاقة من المنظومة الشمسية لتغطية كل الحمل المطلوب، هذا الإجراء يرفع من اعتمادية المنظومة الشمسية ويمنع التصميم الضخم للمنظومات الشمسية، كما أنه لا يعتبر عبئاً اقتصادياً على المنظومة، لأنه لا يعتبر جزء من المنظومة الشمسية.

تشترك منظومة الطاقة الإضافية مع المنظومة الشمسية بثلاث طرق كما هو مبين في الشكل (16.10):

الطريقة (أ): في هذه الطريقة يزود الماء في الخزان بالطاقة مباشرة، عند الموضع (أ). ويتحكم في الطاقة الإضافية عن طريق ترموستات موضوع في الجزء العلوي من الخزان، والذي يقوم بوظيفة-حفظ درجة حرارة الجزء العلوي من الخزان عند النقطة التي حددت بها درجة حرارة الترموستات. تعتبر هذه الطريقة الأبسط والأرخص اقتصادياً، إلا أن عيبها يكمن في أن هذه الطاقة الإضافية الداخلة إلى الخزان سوف ترفع من درجة حرارة الماء في قاع الخزان وبالتالي ستزيد من درجة حرارة دخول الماء إلى المجمعات الشمسية، مما ينتج عنه نقص في الكسب الحراري الشمسي للمنظومة.

الطريقة (**ب**): في هذه الطريقة يزود الماء المغادر من الخزان بالطاقة الإضافية، وبذلك يتم فصل الطاقة الشمسية عن الطاقة الإضافية. تتطلب هذه الطريقة مسخن

منفصل عن وحدة الخزن الشمسية. هذا المسخن يمكن أن يكون مسخناً خطياً بسيطاً أو قد يكون مسخن ماء تقليدي بوعاء منفرد ذي سعة معينة. للحفاظ على درجة حرارة الماء المغادر من المسخن الإضافي إلى الحمل بواسطة ترموستات وذلك وصولاً إلى درجة الحرارة المرغوب فيها. تتمثل ميزات هذه الطريقة في استخدام أقصى المتاح من الطاقة الشمسية من الخزان الحراري الشمسي دون التعرض إلى المجمعات الشمسية. إلا أن عيبها يكمن في الفواقد الحرارية الإضافية التي ستحدث في الخزان الإضافي، مما سينتج عنه زيادة في استهلاك الطاقة التقليدية.

الطريقة (جـ): في هذه الطريقة تُضاف الطاقة الإضافية مباشرة في خط التغذية، وذلك عن طريق اجتياز الخزان الشمسي في حالة عجز المنظومة الشمسية عن تلبية طلب الحمل. إلا إن من عيوب هذه الطريقة هو إهمال الطاقة الشمسية المتجمعة في الخزان الحراري في حالة ما إذا كان مستوى درجة حرارة الماء فيه أقل من درجة حرارة الترموستات وبالتالي سيزيد من تبديد الطاقة إلى المحيط وعدم الاستفادة من المتاح من الطاقة الشمسية.

وبمقارنة الطرق الثلاث يتضح لنا أن الطريقة (ب) هي الأنسب والأجدى اقتصادياً، وبالرغم من هذا، فقد تم اختبار المميزات النسبية لكل طريقة بواسطة (Gutierrez, et al., 1974)، وذلك من خلال محاكاة العمليات الحرارية في الطرق الثلاث لمدة شهر لمنظومات ذات تدوير قسري، وعند ثبوت مساحة المجمعات الشمسية، وحجم الخزان الحراري، كما تم تبني التحليل الطباقي (ثلاث عقد) في الخزان الحراري، وعلى مدى واسع من الظروف الجوية والأحمال. وتم تقييم الأحمال الجزئية المغطاة من قبل منظومة الطاقة الشمسية والطاقة الإضافية. وكما كان متوقعاً، فقد بينت الدراسة للنظام وتحت الظروف الجوية، وعندما تكون النقطة التي حُددت عندها درجة حرارة الترموستات ليست أكبر بكثير من درجة حرارة

الجو، فإن طريقة إضافة الطاقة الإضافية إلى النظام ليست مؤثراً حرجاً في السلوك الحراري للمنظومة. ولكن أظهرت الطريقة (ب) تميزاً ملحوظاً في حالة ما إذا كانت درجة حرارة الماء في الخزان الحراري الشمسي أقل من تلك المعينة في الترموستات وهو الغالب في المنظومات الشمسية المنزلية. وبهذا تكون الطريقة (ب) أفضل من الطريقة (أ) والتي بدورها أفضل من الطريقة (ج).

وتُحسب قدرة الطاقة الإضافية من المعادلة التالية:

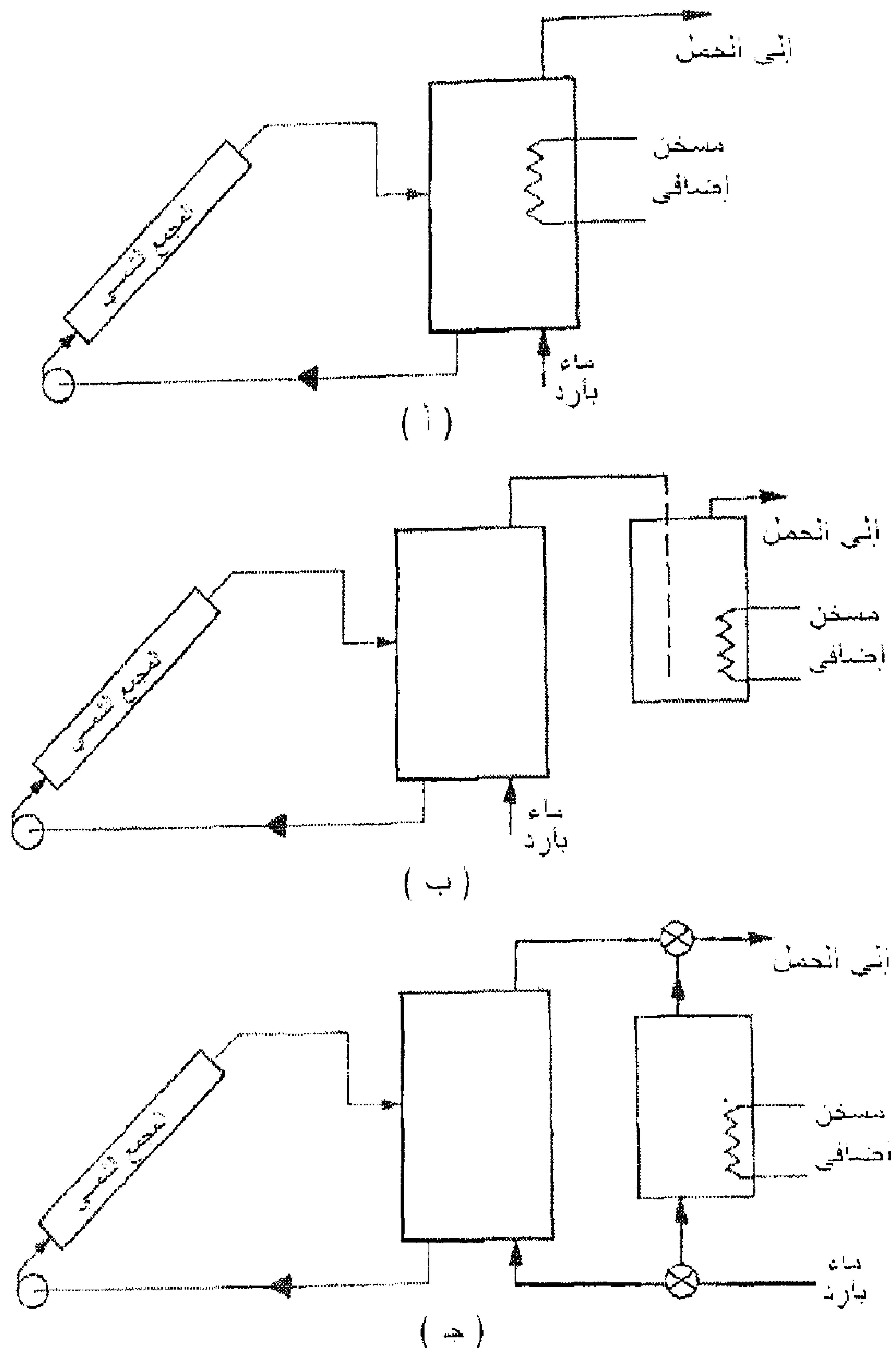
$$L_a = L(1-f) \qquad (40.10)$$

حيث: L_a يمثل قدرة مصدر الطاقة الإضافية $[W]$؛ L يمثل الحمل الحراري الكلي المطلوب تغطيته باستخدام الطاقة الشمسية $[W]$؛ بينما تمثل f معامل التغطية الشمسي.

3.10 معامل التغطية للمنظومة الشمسية

تُستخدم تحليلات وقياسات أداء المنظومات الشمسية لمدة طويلة في التحليلات الاقتصادية. من الملائم في التحليلات الاقتصادية والحرارية لأداء المنظومة الشمسية، صياغة مساهمة الطاقة الشمسية لتغطية جزء من الحمل الكلي بدلالة كمية النقص في الطاقة للوصول إلى تغطية كل الحمل المطلوب، والتي يجب تعويضها عن طريق استخدام المنظومة الإضافية. يُعرف معامل التغطية بأنه النسبة بين الطاقة الشمسية لفترة زمنية محددة إلى الحمل المطلوب تغطيته في نفس الفترة الزمنية. فإذا كانت كمية الحمل L_o، والطاقة الشمسية المتحصل عليها من المنظومة الشمسية L_S، وكمية الطاقة الإضافية التي يجب شرائها لتعويض النقص في الطاقة الشمسية L_A، فإنه ولشهر معين i، يمكن صياغة معامل التغطية على الصورة التالية:

$$f_i = \frac{L_{o,i} - L_{A,i}}{L_{o,i}} = \frac{L_{s,i}}{L_{o,i}} \qquad (41.10)$$



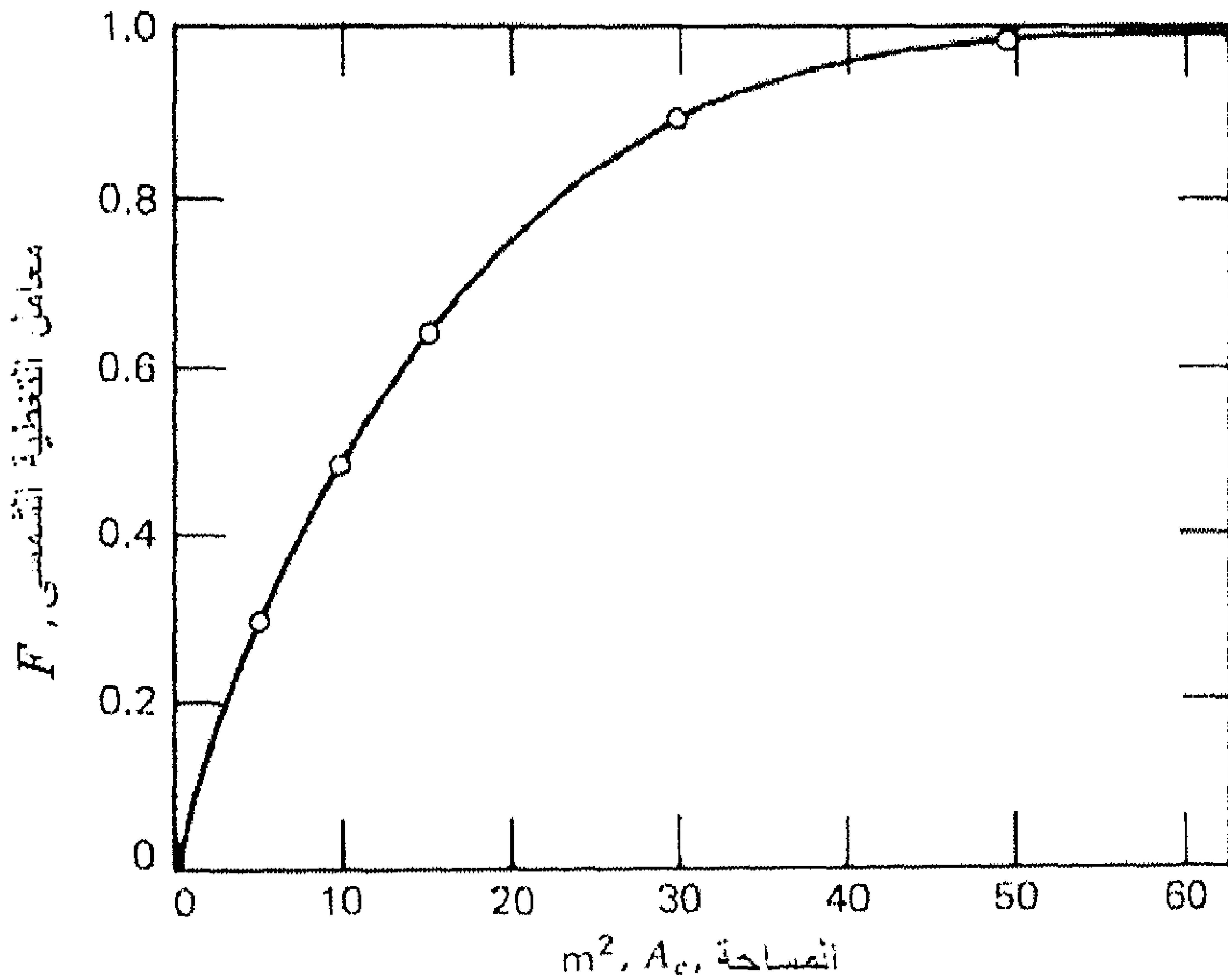
شكل (16.10) طرق ربط الطاقة الإضافية مع منظومة الطاقة الشمسية

وبالتكامل على مدار السنة، فإننا نحصل على معامل التغطية السنوي:

$$F = \frac{L_o - L_A}{L_o} = \frac{L_s}{L_o} = \frac{\sum_{i=1}^{12} f_i \; L_{o,i}}{\sum_{i=1}^{12} L_{o,i}} \qquad (42.10)$$

تعتمد الطاقة المفيدة المنتجة في المنظومات الشمسية الحرارية الفعالة بشدة على مساحة المجمعات الشمسية، والتي بدورها تُحدد حجم المكونات الأخرى للمنظومة الشمسية. ولهذا غالباً ما يُشار لمعامل التغطية بدلالة مساحة مجمعات المنظومة الشمسية، كما هو مبين في الشكل (17.10).

الشكل (17.10) يبين أنه ليس من الاقتصادي أن نحصل على معامل تغطية قريب من الواحد، لأن الزيادة في معامل التغطية تصبح بطيئة جداً مقارنة بالزيادة المطردة في مساحة المجمعات الشمسية وبالتالي الزيادة في الكلفة الاقتصادية للمنظومة. وبطبيعة الحال فإن كلمة الفصل دائماً تكون للتحليل الاقتصادي للحصول على المعامل الأمثل وبالتالي الحصول على المساحة المثالية من المجمعات الشمسية والتي بدورها تُشير إلى الحجم الأمثل للمنظومة الشمسية.

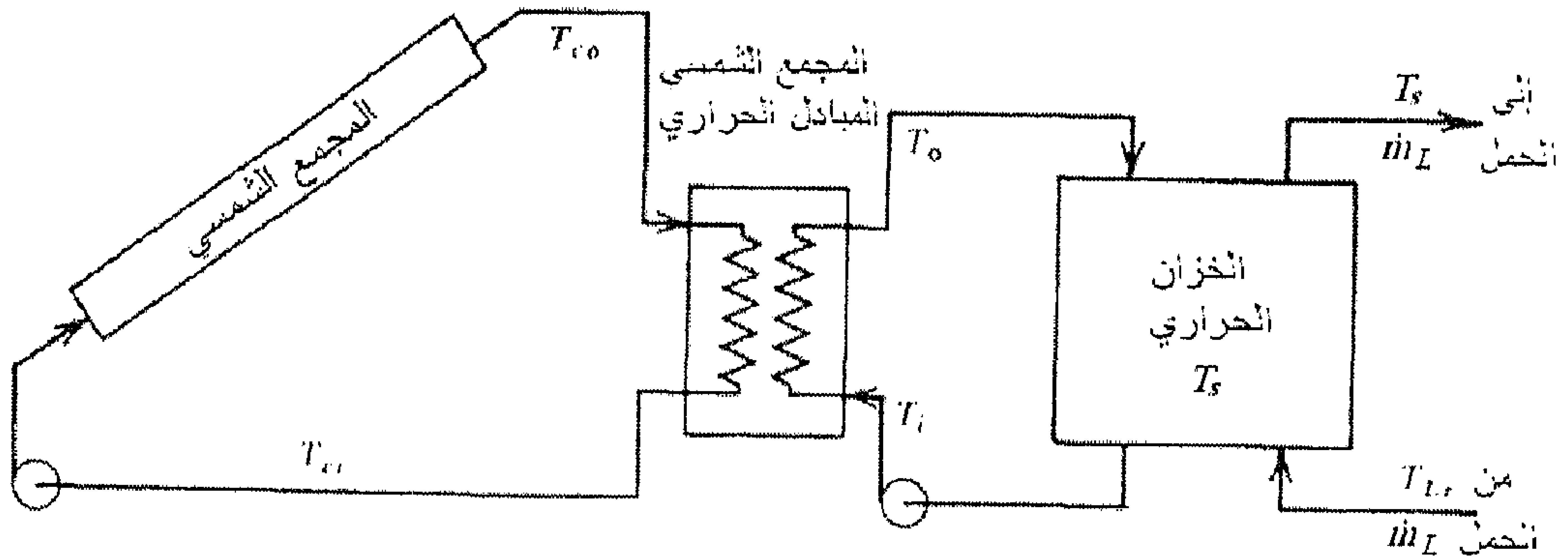


شكل (17.10) علاقة معامل التغطية مع مساحة المجمعات الشمسية لمنظومة شمسية

للحصول على معامل التغطية يجب إجراء حسابات على فترات زمنية متقاربة، ويكون معامل التغطية السنوي هو المتوسط لجميع القيم. معامل التغطية لا يجب أن يتجاوز الوحدة، وفي حالة وجود طاقة أكبر من الحمل فإنها تؤخذ بقيمة الواحد فقط. الطاقة الشمسية المفيدة هي تلك الطاقة المتحصل عليها من آخر نقطة في المنظومة، فعلى سبيل المثال للمنظومة الشمسية المبينة في الشكل (18.10)، فإن الطاقة المفيدة المنتجة من المنظومة الشمسية ستكون على الصورة التالية:

$$q_{u,s} = (\dot{m}\,Cp)_L\,(T_s - T_{L,r}) \qquad (43.10)$$

حيث: $T_{L,r}$ يمثل درجة حرارة المائع العائد من الحمل، T_s هي درجة حرارة الخزان الحراري (في حالة الخلط الجيد أو درجة حرارة الطبقة العليا من الخزان في حالة التطابق الحراري)، ويشير المقدار $(\dot{m}\,Cp)_L$ إلى السعة الحرارية للمائع. وبالتالي فإن للخزان الحراري تأثير واضح في معامل التغطية وبالأخص سعته التخزينية. العلاقة بين سعة الخزان الحراري ومعامل التغطية مبينة في الشكل (19.10).



شكل (18.10) منظومة شمسية نموذجية

4.10 تأثير بعض المتغيرات التشغيلية والتصميمية على أداء المنظومات الشمسية

يعتبر الحصول على التصميم الأمثل للمنظومات الهندسية من المسائل المهمة للمهندسين والعلماء، إلا أنه لا تتوفر الكثير من المراجع العلمية في هذا الخصوص وبالأخص في مسألة القيم المثالية للمتغيرات التصميمية في المنظومات الشمسية. فإذا ما تم تصنيف هذه المتغيرات إلى متغيرات تصميمية (والتي تشمل حجم أجزاء المنظومة الشمسية والمنظومة الاحتياطية) وأخرى تشغيلية (وتتضمن معدلات تدفق الموائع خلال المنظومة). في الوقت التي تعتمد دراسة التصميم الأمثل على التحليلات الاقتصادية والطاقوية للوصول إلى معامل التغطية الشمسية المثالي وبالتالي الحصول على مساحة المجمعات الشمسية المثالية والذي بدوره يُشير إلى حجم كافة أجزاء المنظومة الشمسية، فإن التحليل الطاقوي هو الذي يغلب دائماً على دراسة المتغيرات التشغيلية بما في ذلك معدل تدفق الموائع خلال المنظومة الشمسية. وبنظرة سريعة على تحليل (Beckman, 1982)، وباعتبار معادلة الطاقة المفيدة، $q_u = (\dot{m}\,Cp)_c\left(T_{f,o} - T_{f,i}\right)$، فإن كمية تدفق المائع خلال المجمع الشمسي للحصول على أكبر قدر من الطاقة المفيدة، تقترب من مالا نهاية. في دراسة (Nassar, 1999, 2001)، قام بدمج العامل الاقتصادي مع الطاقوي للوصول إلى معدل تدفق مثالي خلال المجمعات الشمسية لدراسة خاصة والتي كانت بمعدل $29\ kg/h\cdot m^2$ لوحدة مساحة المجمعات الشمسية.

لتحقيق الهدف من هذا الجزء، لابد من مراجعة تأثير معدلات التدفق على السلوك الحراري – الاقتصادي للمنظومات الشمسية، والذي سبق ذكره في الفصول السابقة، وسيتم التركيز على المجمعات الشمسية وعلى التأثيرات الأخرى خلال النص وبإيجاز شديد.

1.4.10 تأثير معدل التدفق على السلوك الحراري للمنظومة الشمسية

يُحدد السلوك الحراري للمجمعات الشمسية بأربعة معاملات. هذه المعاملات هي: معامل الفقد الحراري U_c؛ معامل كفاءة المجمع F'؛ الكفاءة الحرارية للمجمع η_c؛ معامل الإزاحة الحرارية F_R. فإذا ما تم اختبار ملائمة هذه المعاملات الأربعة الأولى مع كمية تدفق المائع خلال المجمع الشمسي، فإن النتيجة ستكون إيجابية، أي أنه، كلما زادت كمية التدفق كلما اقتربت جميع هذه المعاملات من القيم المرغوب فيها. ولكن النتيجة ستكون مغايرة إذا ما تم الأخذ بمعامل تسخين المائع F_T والذي يجب أن يُدرج في المواصفات الحرارية للمجمعات الشمسية (Nassar, 1999). يُصاغ معامل تسخين المائع F_T هذا على الصورة التالية:

$$F_T = \frac{F_R}{\dot{m}\ Cp} \qquad (44.10)$$

ففي الوقت الذي لا يتجاوز فيه F_R الوحدة، فإن المقام يمكن أن يكبر إلى مالا نهاية، وبالتالي فإن قيمة F_T ستصغر بزيادة معدل تدفق المائع. كما يمكن صياغة كمية الزيادة في درجة حرارة خروج المائع من المجمع الشمسي على الصورة التالية:

$$\Delta T_f = A_c\ F_T\ \left[H_a - U_c\ \left(T_{fi} - T_a\right)\right] \qquad (45.10)$$

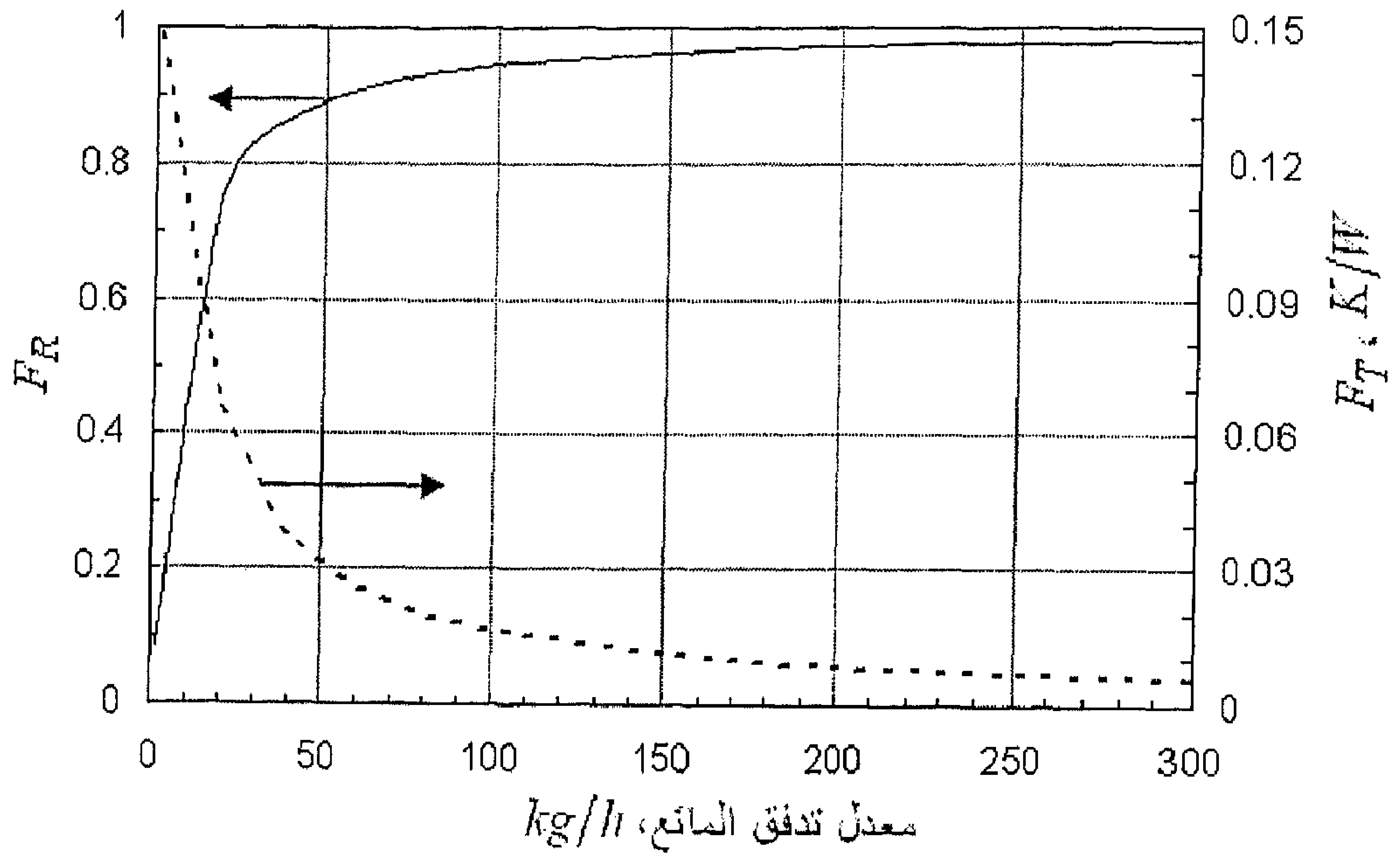
ولأن مجسات درجة الحرارة الخاصة بأجهزة التحكم المسئولة عن تشغيل وفصل المنظومة الشمسية والمنظومة الإضافية، تتحسس درجات حرارة وليس كمية الحرارة، فإن درجة حرارة خروج المائع من المجمعات الشمسية والذي يدل عليه معامل تسخين المائع سيكون له الدور المهم في صياغة السلوك الحراري للمنظومة الشمسية.

من الواضح أن معامل الإزاحة الحرارية يزداد مع الزيادة في التدفق وبالعكس مع معامل تسخين المائع، كما هو مبين في الشكل (19.10)، ولذا فإن وجود نقطة مثالية لمعدل التدفق للربط بين القيمة الحرارية والتي يمثلها معامل الإزاحة الحرارية وبين درجة حرارة المائع والتي يمثلها بدوره معامل تسخين المائع، يجب أن تُحدد.

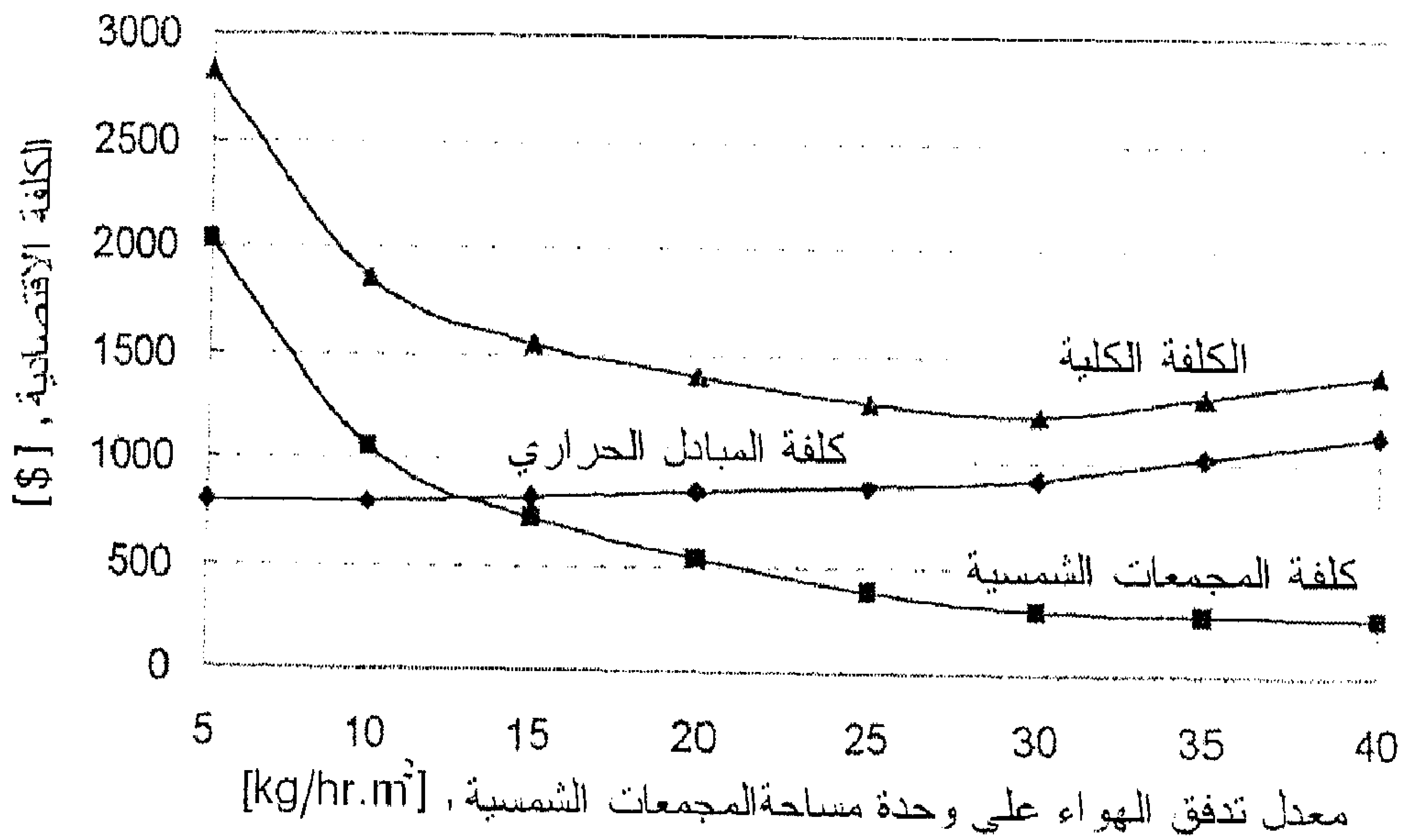
بما أن المجمعات الشمسية لا تعمل منفردة، بل مع أجزاء أخرى لتكون مجتمعة المنظومة الشمسية، والتي تكون وظيفتها الوصول إلى أقصى معامل تغطية للحمل وذلك عند أقل التكاليف (رأس المال والتشغيل). لذا يجب إجراء عملية محاكاة للمنظومة الشمسية كوحدة واحدة.

إن نتائج معدلات التدفق المثالية خلال عناصر المنظومة الشمسية المتحصل عليها (Nassar, 1999)، (Nassar, Salem, 2002a, 2002b) مبينة في الأشكال (20.10) - (24.10).

حيث يُشير الشكل (20.10) إلى العلاقة الاقتصادية بين معدل تدفق المائع (الهواء) وكلفة عنصر دورة المجمع الشمسي والمتكونة في هذه الحالة من المجمعات الشمسية والمبادل الحراري، ويتضح من الشكل أن أقل كلفة إجمالية للمجموعة هي عند معدل تدفق الهواء في الدورة لكل وحدة مساحة المجمعات الشمسية يساوي $29\ kg/hr.m_c^2$.

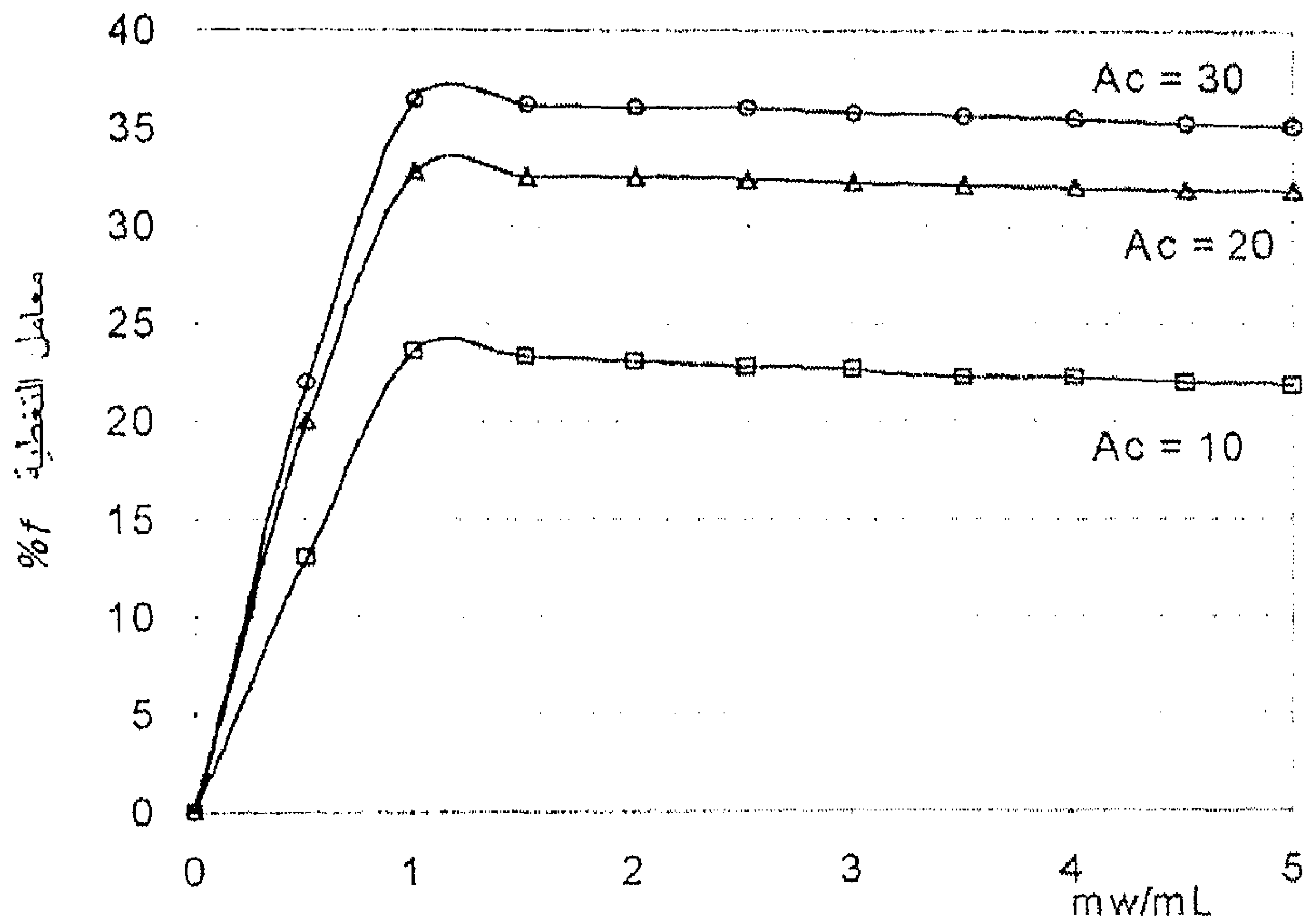


شكل (19.10) علاقة معامل الإزاحة الحرارية ومعامل تسخين المائع مع معدل تدفق المائع في المجمع الشمسي



شكل (20.10) كلفة المبادل الحراري، كلفة المجمعات الشمسية والكلفة الكلية للمجموعة بدلالة معدل تدفق المائع خلال وحدة مساحة المجمعات الشمسية

بينما يُشير الشكل (21.10) إلى معامل التغطية بدلالة نسبة معدل تـدفق المـائع (الماء) في دورة المبادل الحراري-الخزان الحـراري m_W إلـي معـدل تـدفق المـاء إلى الحمل m_L ولعدد من مساحات المجمعات الشمسية. وكما هو واضح مـن الشـكل فإنه وبصورة عامة يكون معامل التغطية أكبر ما يمكن عندما يتساوى معـدل تـدفق المائع عبر دورة المبادل الحراري - الخزان الحـراري مـع معـدل تدفقـه خـلال دورة الحمل – الخزان الحراري.

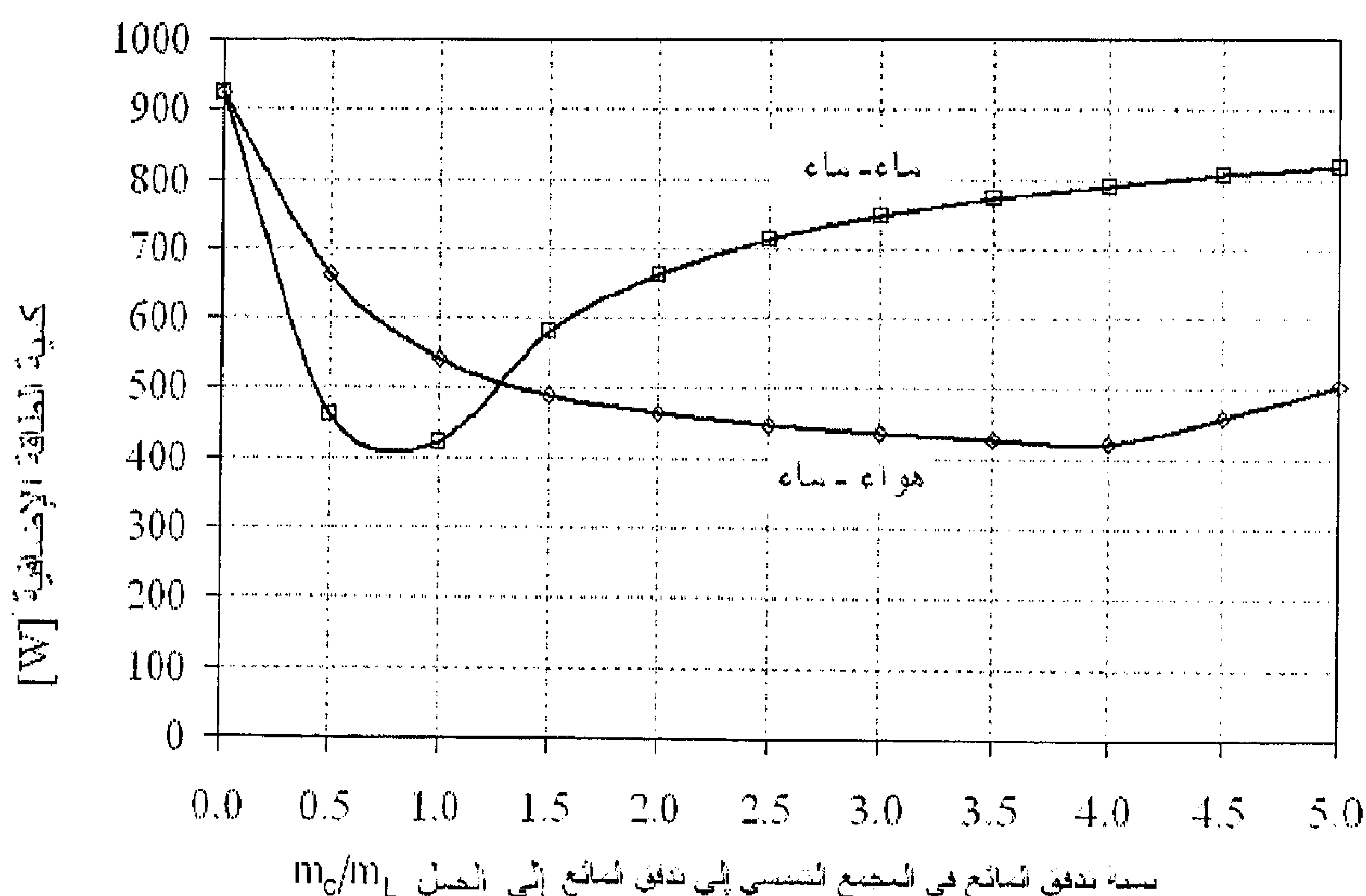


شكل (21.10) علاقة معامل التغطية للمنظومة الشمسية مع نسبة تدفق المائع في مجموعة المبادل الحراري – الخزان الحراري إلى معدل تدفق المائع إلى الحمل، لعدة مساحات للمجمعات الشمسية

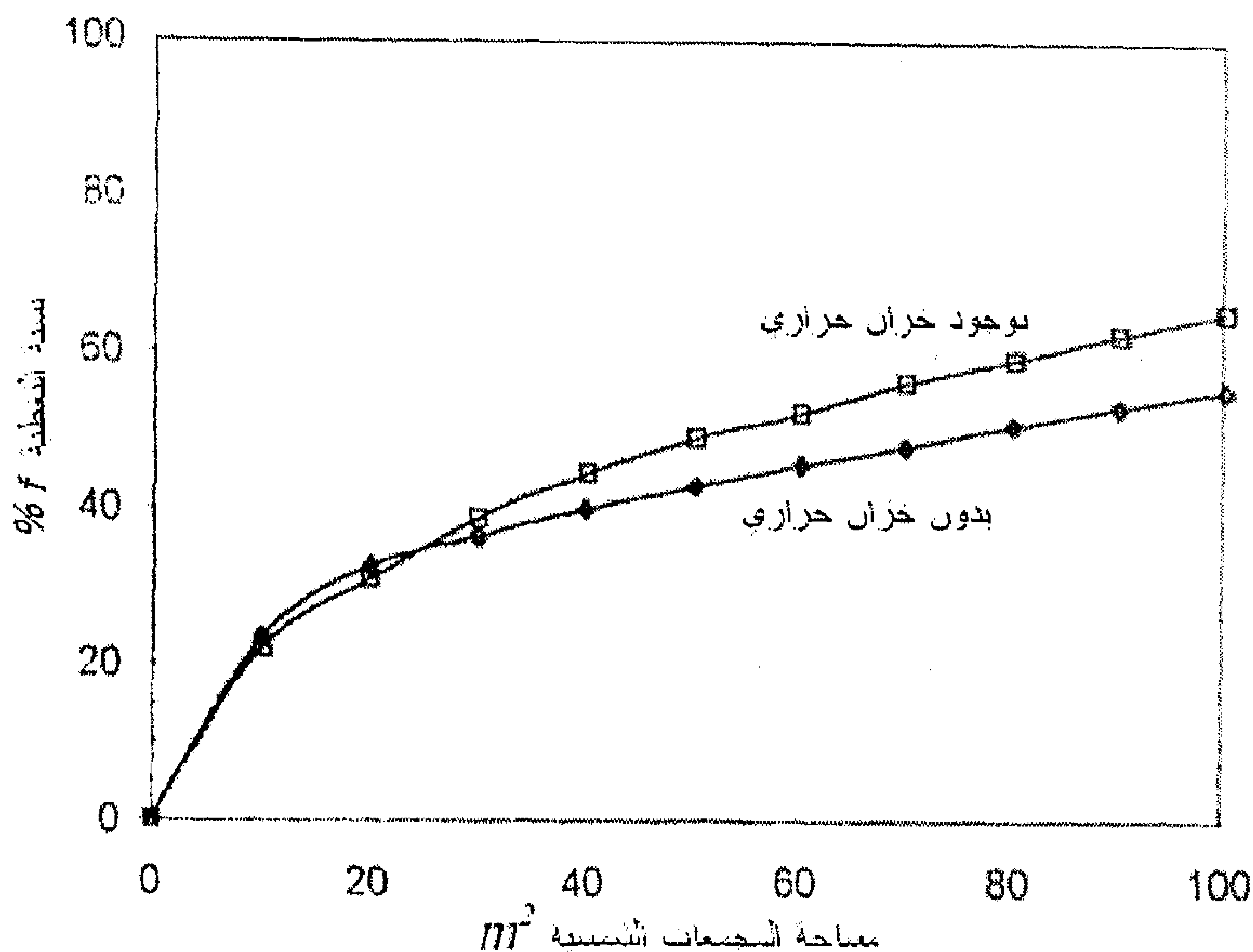
أما الشكل (22.10) فيبين علاقة كمية الطاقة الإضافية مع نسـبة معـدل تـدفق المائع (الهواء أو الماء) خلال دورة المجمع الشمسي m_c إلى معدل تدفق المائع (المـاء) خلال دورة الحمل m_L، بوجود أو عدم وجود المبادل الحراري والخزان الحـراري.

فإن النتيجة تدل على أن أقل قيمة للطاقة الإضافية تحدث عندما تتساوى الكميات الحرارية للمائعين (أي $(\dot{m}\,Cp)_C = (\dot{m}\,Cp)_L$)، ففي حالة الماء – الماء تكون النسبة المثالية لمعدلات التدفق مساوية الواحد، أما في حالة الهواء - الماء فإن النسبة المثالية لمعدلات التدفق تقترب من القيمة 4 ، وهي نسبة الحرارة النوعية للماء إلى نسبة الحرارة النوعية للهواء تقريباً.

وبناءً على ما سبق ذكره، ومن خلال دراسة (Nassar, 1999)، تبين أنه للأحمال الحرارية الكبيرة والمستمرة يمكن الاستغناء عن الخزان الحراري وتصبح المنظومة الشمسية عبارة عن مجمعات شمسية ومنظومة توزيع الطاقة وجهاز التحكم بالإضافة إلى المبادل الحراري في بعض الأحيان. السلوك الحراري لمثل هذه المنظومة يكون أفضل من تلك التقليدية (بوجود خزان حراري) وذلك كما هو موضح في الشكل (23.10).



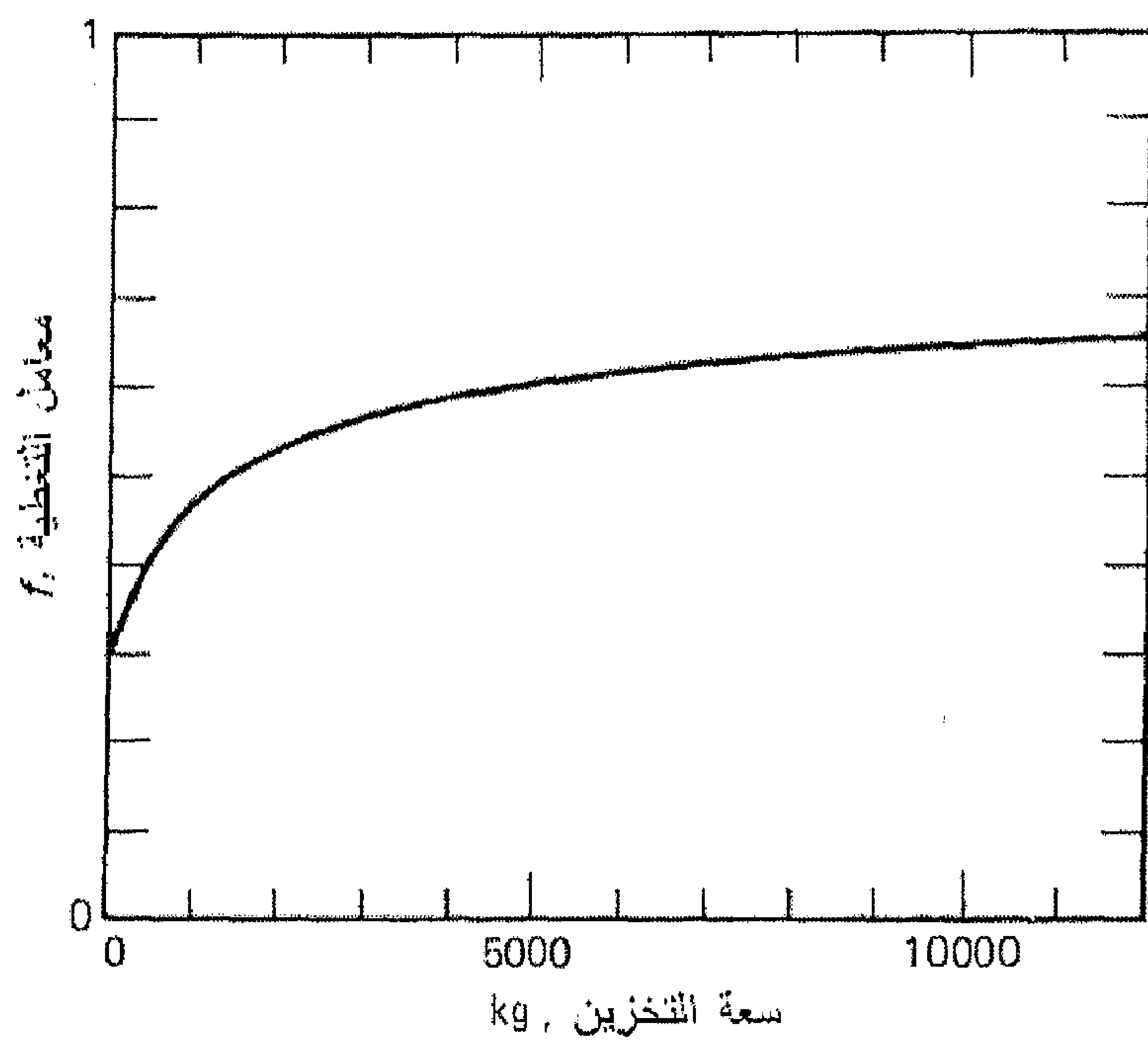
شكل (22.10) كمية الطاقة الإضافية كدالة في نسبة تدفق المائع في دورة المجمع الشمسي m_c إلى تدفق المائع في دورة الحمل m_L



شكل (23.10) نسبة التغطية بالطاقة الشمسية كدالة في مساحة المجمعات الشمسية لمنظومة تقليدية بخزان حراري وأخري بدون خزان حراري

2.4.10 تأثير سعة التخزين على السلوك الحراري للمنظومة الشمسية

يبين الشكل (24.10) علاقة معامل التغطية بسعة التخزين، وكما هو مبين في الشكل، فإن الكسب في معامل التغطية يصبح معدوماً بعد 5000 kg كسعة التخزين وبالتالي فإن سعر المنظومة سيرتفع بدون أي كسب من جهة التشغيل. ولذا فإنه ليس اقتصادياً أن نجعل حجم الخزان الحراري كبيراً، لأن الزيادة في معامل التغطية تصبح بطيئة جداً مقارنة بالزيادة المطردة في حجم الخزان الحراري، وبالتالي الزيادة في الكلفة الاقتصادية للمنظومة. والعامل الأكثر أهمية في هذا الموضوع هو التحليل الاقتصادي للحصول على المعامل الأمثل وبالتالي الحصول على الحجم المثالي لمنظومة التخزين والتي بدورها هي جزء من الحجم الأمثل للمنظومة الشمسية ككل.



شكل (24.10) علاقة معامل التغطية بسعة التخزين (Duffie, Beckman,1991)

المراجع

1. ASHRAE (1989), *Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta.

2. Beckman, W.A., Klein, S.A., Duffie, J.A., *Solar Heating Design by f-Chart Method*, Wiley, New York, (1977).

3. Beckman, W.A., *Solar Energy*, **21**, 531 (1978). "Duct and Pipe Losses in Solar Energy Systems."

4. Brinkworth, B., *Solar Energy*, **17**, 331 (1975). "Selection of Design Parameters for Closed-Circuit Forced-Circulation Solar Heating Systems."

5. deWintrer, F., *Solar Energy*, **17**, 335 (1775). "Heat Exchanger Penalties in Double Loop Solar Water Heating Systems."

6. Duffie, J. A., Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Suns inc., 2nd edition, (1991).

7. Gutierrez, G., Hincapie, F., Duffie, J.A., Beckman, W.A., *Solar Energy*, **15**, 287 (1974). "Simulation of Forced Circulation Water Heaters, Effects of Auxiliary Energy Supply, Load Type and Storage Capacity."

8. Hsieh, S. J., *Solar Energy Engineering*, Prentic-Hall, (1981).

9. Kays, W.M., London, A.L., *Compact Heat Exchangers*, McGraw-Hill, New York, (1964).

10. Klein, S.A., Beckman, W.A., Duffie, J.A., *Solar Energy*, **17**, 29 (1975). "A Method of simulation of Solar Processes and its Applications."

11. Kreider, J.F., Rabl, A., *Heating and Cooling of Buildings - Design for Efficiency*, McGraw-Hill Book Co., Singapore, (1994).

12. Kreith, F., Kreider, J.F., *Principles of Solar Engineering*, Hemisphere Publishing Corporation, USA, (1978).

13. Kreith, F., *Principles of Heat Transfer*, Intext Educational Publishers, New York, (1973).

14. Kut, D., Hare, G., *Applied Solar Energy*, Cambridge University Press, England, 2nd ed., (1983).

15. Nassar, Y.F, *A Design Procedure of the Domestic Solar Heating Systems on the Base of Air-Heating Flat-Plate Solar Collector*, Ph.D. Theses, Moscow-Russia, (1999).

16. Nassar, Y.F., Salem, A.A., *The Proceedings of the Symposium on Renewable Energies in Hot Climate Regions*, October 30- 31 (2002), Hoon-Libya." An Optimization Procedure of the Working Fluid Mass Flow Rate through a Flat-Plate Solar Collector in Domestic Solar Heating Systems."

17. Nassar, Y.F., Salem, A.A., *The Proceedings of the International forum on renewable energies (FIER 2002)*, **389**, May 08-10 (2002), Tetuan, Morocco." The Utilizability Concept of the Thermal Storage in Solar Heating Systems."

18. Oonk, R., Jones, D.E., Cole-Appel, B.E., *Solar Energy*, **23**, 535 (1979). "Calculation of Performance of N Collectors in Series from Test Data on a Single Collector."

19. Potter, P.J., *Power Plant Theory and Design*, Ronald Press, New York, (1959).

20. Waller, B., *Heating, Piping and Air Conditioning*, **62**, 51 (1990). "Piping from the Beginning."

الفصل الحادي عشر
منظومات تجميع وخزن الطاقة الشمسية

تتضمن منظومات تجميع وخزن الطاقة الشمسية منظومتين أساسيتين وهما: البرك الشمسية والحفر الشمسية. وسنبدأ في هذا الفصل بعرض مبسط للبرك الشمسية.

1.11 البرك الشمسية

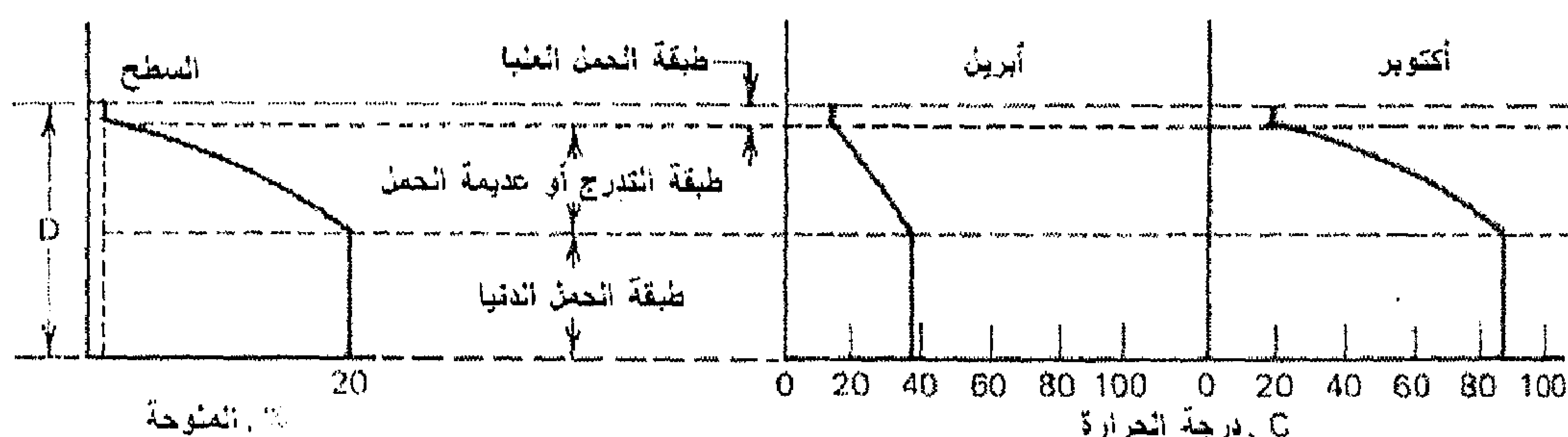
تمثل فكرة البرك الشمسية طريقة جيدة لتجميع وخزن الطاقة الشمسية وذلك في بحيرة ضحلة ومالحة ومرتبة بحيث تجعل التدرج في درجات الحرارة معكوساً عن المعتاد، أي بمعنى، الطبقات الساخنة تكون في قاع البركة. ثم تستخدم الطاقة المخزونة في القاع لسد جزء من الطلب على الطاقة في العديد من التطبيقات الهندسية الحرارية ذات درجات حرارة منخفضة، لأن هذا النظام وتحت الشروط المثالية قادر على الوصول لدرجات حرارة تتراوح بين $40-50^{\circ}C$ فوق درجة حرارة الجو. ومن أهم هذه التطبيقات تحلية المياه وتوليد الطاقة الكهربائية.

1.1.11 البرك الشمسية المتدرجة الملوحة

لوحظ في البحيرات الطبيعية انقلاب تدرج درجات الحرارة عن المعتاد بحيث كانت درجات الحرارة في الطبقات الدنيا أعلى منه في الطبقات القريبة من السطح. هذه البحيرات لها تراكيز عالية من الأملاح المذابة في الطبقات الدنيا ويضعف التركيز في اتجاه السطح العلوي للبحيرة. أوحت هذه الظاهرة إمكانية إنشاء واستخدام البرك كمجمع شمسي كبير المساحة. العديد من الباحثين (Tabor, Mate, 1965)، (Weinberger, 1964), (Tabor, 1964), (Tabor, Weinberger, 1981)

قدموا تقاريراً عن دراسات نظرية وتجريبية لهذه البرك المتدرجة الملوحة والتي غالباً ما يُشار إليها بالبرك الشمسية. ومن ثم أُقترحت البرك الشمسية لإنتاج الطاقة الكهربائية، تحلية المياه، وتزويد المباني بالطاقة الحرارية.

يوضح الشكل (1.11) قطاعاً مبسطاً لبركة شمسية متدرجة الملوحة والتدرجات النموذجية للملوحة ودرجات الحرارة في بركة شمسية عاملة (Duffie, Beckman, 1991).



شكل (1.11) منحنيات تدرج الملوحة ودرجات الحرارة لشهري ابريل وأكتوبر، لبركة متدرجة الملوحة

تقسم البركة الشمسية إلى ثلاث طبقات رئيسية؛ في الأعلى تكمن طبقة متجانسة من محلول ملحي خفيف التركيز تسمى بطبقة الحمل العليا (UCZ). تمثل الطبقة التالية طبقة رقيقة، وتسمى بمنطقة تدرج التركيز أو المنطقة العديمة الحمل (NCZ)، والتي تعمل كطبقة عازلة لكبح تيارات الحمل من الطبقة الدنيا إلى الطبقة العليا، ونمط انتقال الحرارة بين الطبقة الدنيا والطبقة العليا يكون بالتوصيل فقط. بينما تحتوي الطبقة الدنيا على محلول ملحي مركز وتسمى بمنطقة الحمل الدنيا (LCZ).

الفكرة الأساسية في عمل البرك الشمسية هي المحافظة على تدرج سريع لتركيز الأملاح في الطبقة الوسطى للبركة الشمسية وكذلك المحافظة على كثافة المحلول

الملحي المركز في الطبقة الدنيا. للحصول على درجات حرارة قصوى يجب أن تكون كثافة هذه الطبقة أعلى من كثافة الطبقات الأخرى الأخف تركيزاً. تنفذ معظم الأشعة الشمسية من خلال الطبقات العليا، لتمتص في الطبقة الدنيا وبالتالي تصبح ساخنة ويتم تخزين هذه الطاقة عن طريق رفع درجة حرارة الماء في الطبقة الدنيا. ونظراً للتدرج السريع لتركيز الأملاح في الطبقة الوسطى، فإنها تقوم بحجر التيارات المائية الساخنة ومنعها من الصعود إلى سطح البركة.

في هذا الجزء وصف مختصر للعديد من الظواهر التي تحدث في البرك الشمسية العاملة، ويشتمل هذا الوصف على: عمليات امتصاص وتشتيت الأشعة الشمسية خلال الماء والتي تؤدي بالبركة إلى التوجه نحو التجانس؛ استقرارية البركة؛ بناء البرك الشمسية؛ المتطلبات من الماء والملح؛ الاستنزاف الحراري من البركة، إضافة إلى عرض مفصل للبركة الشمسية الليبية.

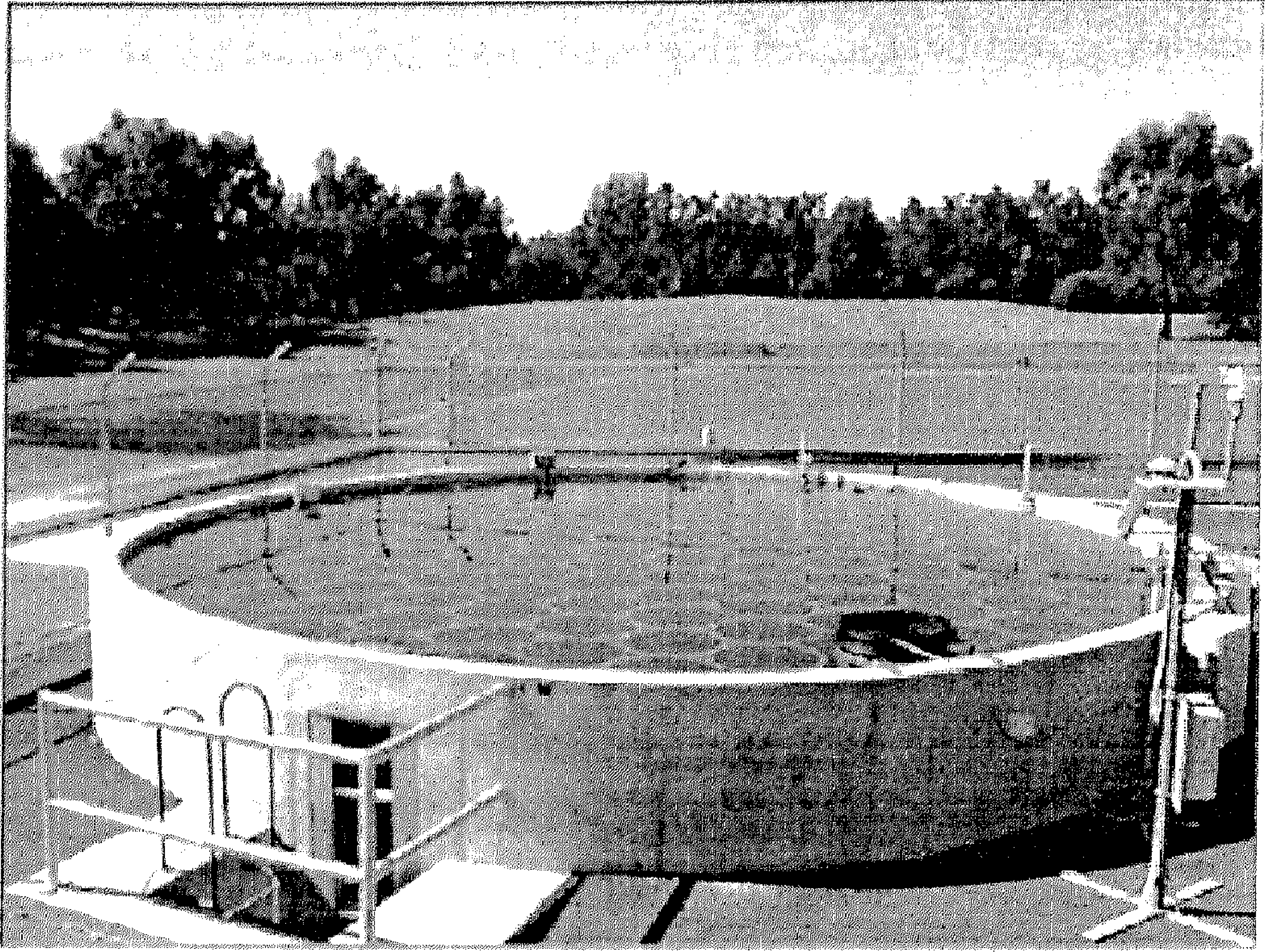
يمثل انعكاس الأشعة الشمسية من سطح ماء البركة تقريباً 5% من الأشعة الشمسية الساقطة. بينما تمتص الأشعة النافذة خلال الماء ذات الأطوال الموجية الطويلة قرب السطح، وتشير القياسات إلى أن جزء قليل من الأشعة ذات الطول الموجي $\lambda > 0.7\ \mu m$ تمر من خلال متر واحد من الماء النظيف، ولكن أكثر من 95% من الأشعة بمدى موجي يتراوح بين $0.3 - 0.6\ \mu m$ وبالتالي فإنها تمر من خلال هذه الكمية من الماء. وفي نفس الوقت، تشير هذه القياسات إلى أنه عندما تكون زاوية سمت الشمس $Z = 12°$، والتي يكون عندها الشعاع الشمسي قريباً من المحور العمودي على سطح البركة، وفي هذه الحالة، فان كمية كبيرة من الأشعة الشمسية ستنفذ وتلقى طريقها إلى قاع البركة الشمسية.

تؤدي تدرجات التركيز الموجودة في البركة الشمسية إلى انتشار الملح من الطبقات المركزة في القاع إلى الطبقات الأخف تركيزاً في الأعلى. في سبيل الحفاظ

على اتزان البركة، يجب إضافة الملح إلى الطبقة الدنيا وإزالته من الطبقة العليا، وذلك عن طريق حقن وسحب المحاليل من الطبقات الدنيا والعليا على التوالي. وضح (Nielson, 1978) أن معدل انتقال الملح من الطبقة الدنيا يكون بمعدل $3\, kg/m^2$ في الشهر. وإن كميات مماثلة من المحلول الخفيف التركيز يجب أن تطرح خارج الطبقة العليا وإضافة محلول أقل تركيزاً فيها. وكذلك يجب تعويض كمية الماء المتبخرة من سطح البركة.

يتراوح عمق البرك الشمسية بين $1.5-4\, m$، وتبنى البرك عادة على مستوى سطح الأرض بواسطة الحفر وإقامة السدود وفرش الأغطية الغشائية المانعة للتسرب. فالتسرب من البرك يمكن أن يعيق أداء البركة لتجميع وخزن الطاقة الشمسية.

تموج السطح نتيجة للرياح يؤدي إلى خلط وزيادة في سماكة طبقة الحمل العليا وفي النهاية تصل بالبركة إلى حالة استقرار التركيز والذي يفسد أداء البركة. ولتخميد هذه الأمواج نستخدم شبكات معدنية عائمة أو مصفوفات من الأنابيب العائمة (كما هو مبين في الشكل (2.11)) (Jaefarzadeh, Akbarzadeh, 2002)، وكلما زادت مساحة البركة كلما كان السيطرة على هذه الأمواج أكثر صعوبة. وكذا الحال بالنسبة للأمطار، غير أنه لا توجد تقنية لتفادي تأثير الأمطار على تركيز الأملاح في البركة الشمسية (Punyasena, et al., 2003).



شكل (2.11) صورة لبركة شمسية تجريبية في معمل الطاقة البديلة بقسم الهندسة الميكانيكية والصناعية بمدينة Melbourne في أستراليا. البركة دائرية الشكل بقطر $8\ m$، مساحة البركة الكلية حوالي $50\ m^2$، وبعمق $2.26\ m$. الحلقات العائمة على سطح البركة مصنوعة من البوليثيلين العالي الكثافة ($940\ kg/m^3$)، بقطر $0.6\ m$ وبسماكة $1.5\ mm$ وارتفاع $35\ mm$ مربوطة ببعضها

هناك العديد من الميزات للبرك الشمسية الكبيرة ومنها: تكون نسبة المحيط إلى المساحة السطحية أقل للبرك الكبيرة. في الوقت التي تمثل فيه الفواقد الحرارية من أطراف البركة الكبيرة ذات أهمية كبيرة فإن أدائها يكون أفضل منه في البرك الصغيرة؛ يقل تأثير الجدران المحيطة بالبركة كسبيل لنمو تيارات الحمل في طبقات التدرج الملحي نتيجة لتدرجات درجة الحرارة وانتقال الحرارة بالتوصيل خلال الجدار يكون أقل؛ كما أن كلفة بناء البركة على وحدة المساحة ستقل كلما زادت

مساحة البركة الشمسية. وتتراوح مساحات البرك الشمسية العاملة من $300\,m^2$ كمحطة تجريبية إلى $210{,}000\,m^2$ كمحطة حرارية.

استنزاف الحرارة من الطبقة الدنيا للبركة يمكن إنجازه إما عن طريق استخدام مبادل حراري كبير المساحة غاطس في قاع البركة، أو عن طريق سحب بطيء منظم للماء المالح الساخن من موضع في أدنى مستوى الطبقة الدنيا من البركة ثم يُعاد كماء مالح بارد إلى نفس المستوى في موضع أخر.

يمثل عدم نظافة البركة مشكلة، لأن الملوثات تعمل على تقليل النفاذية. بعض الأوساخ يطفو على السطح والبعض الأخر يغوص في قاع البركة وتلك التي تكون كثافتها مقاربة لكثافة المحلول تطفو في المنتصف. ويمكن إزالة هذه الأوساخ عن طريق الترشيح أو الكشط. وتزداد كمية الأوساخ بزيادة مساحة البركة، والمسبب الرئيسي فيها هو العواصف.

2.1.11 نظرية البركة الشمسية

لقد تم نشر العديد من الدراسات لنظرية البركة الشمسية المتباينة السمات (Nielsen, 1988),

(Hull, et al., 1984, 1986,1989) ، وتتصدر هذه الدراسات بمقدمة مفيدة عن تاريخ البرك الشمسية. هذا الجزء يستعرض بعض السمات الأساسية لنظرية البرك الشمسية، وللمزيد من المعلومات يجب الرجوع إلى الدراسات الأصلية.

يمكن صياغة معادلات الحالة المستقرة لعمل البرك الشمسية على صيغة معادلة Hottel-Whillier (المعادلة 58.3) (Kooi, 1979). تتم الإزاحة الحرارية من البركة عن طريق استنزاف المحلول الملحي وتتم عملية الحقن في طبقة الحمل الدنيا (LCZ). للبرك الشمسية المعامل F' يساوي الواحد.

يُحسب تدرج درجات الحرارة في اتجاه السريان (الأفقي) من نقطة الحقن إلى نقطة الاستنزاف بواسطة المعامل F_R، والذي له نفس الصورة كتلك في الجمعات الشمسية المستوية، وتقترب قيمته من الواحد. أما معامل الفقد الحراري الكلي U_c فيتضمن مشاركة كل من الفاقد العلوي خلال الطبقة العديمة الحمل (المتدرجة الملوحة) والفاقد إلى الأرض والفواقد من أطراف البركة. استخدم (Hull, et al., 1986) تحليل Kooi وعمل على إيجاد الفواقد من الأرض لاشتقاق معادلة للبرك الشمسية المستقرة، وعندما تكون قيمة F_R قريبة من الواحد، فإن الطاقة المفيدة يمكن صياغتها على الصورة التالية:

$$q_u = A_c \left[I.(\tau\,\alpha) - \left(\frac{k}{\Delta x} + g \right) (T_{LCZ} - T_{UCZ}) \right] \qquad (1.11)$$

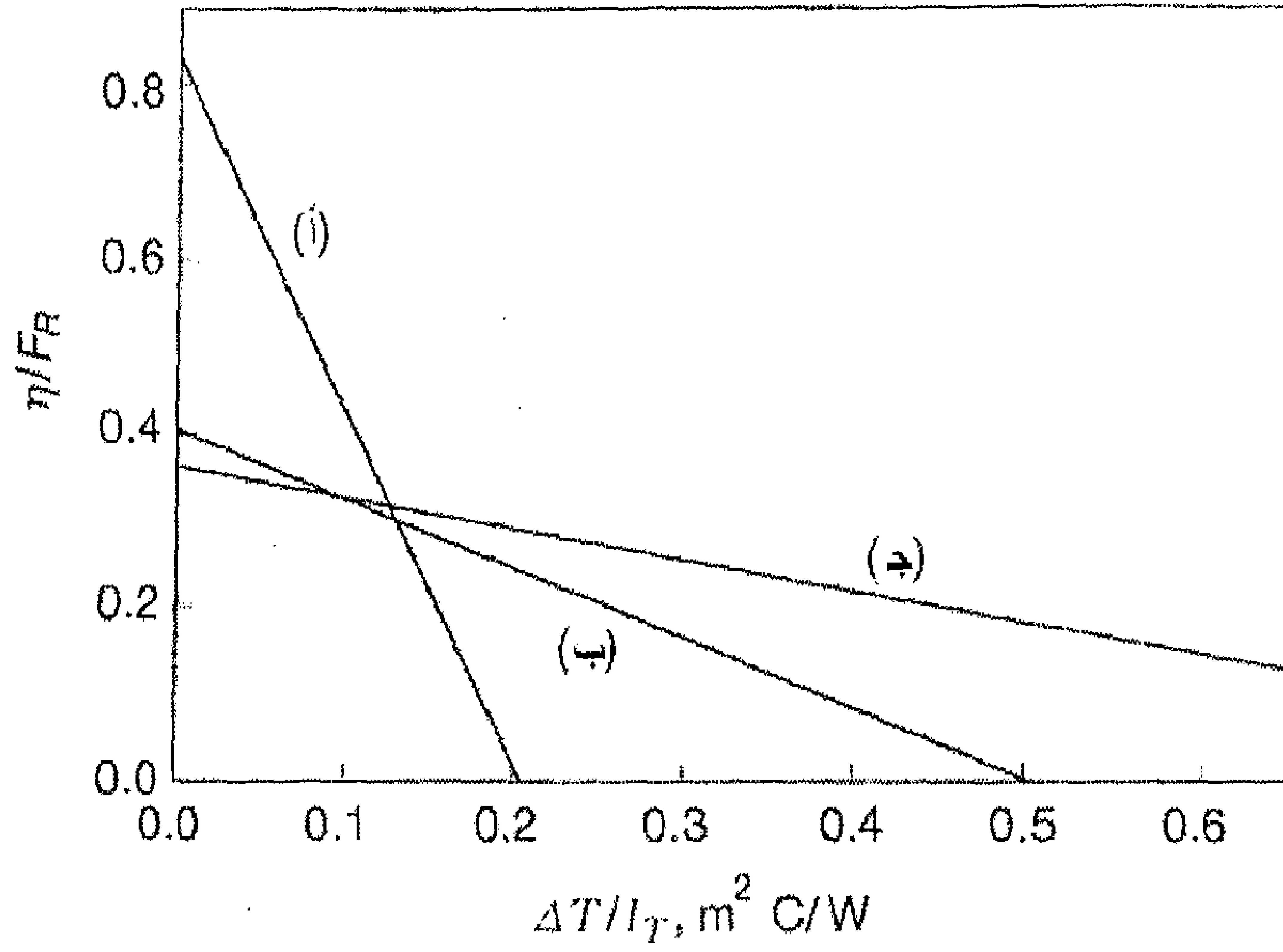
حيث يشير الرمز k إلى الموصلية الحرارية للمحلول الملحي المتدرج التركيز (قريبة من الموصلية الحرارية للماء)؛ Δx - سمك الطبقة العديمة الحمل؛ g تمثل معامل الفقد الحراري الأرضي، والذي يمكن تقديره من المعادلة التالية:

$$g = \left(a/x_g + P\,b/A \right)/k_g \qquad (2.11)$$

حيث: P تمثل محيط البركة التي مساحتها A؛ k_g - الموصلية الحرارية الفعالة للأرض تحت البركة؛ ويدل الرمز x_g على المسافة بين قاع البركة وشبكة الماء أسفل البركة. الثوابت b, a ذات قيم خاصة لبرك معينة. يتبنى هذا الاشتقاق فرضية أن كل الفواقد العلوية والأرضية تحدث عند نفس درجة حرارة طبقة الحمل العليا T_{UCZ}، والتي تكون قريبة من درجة حرارة الهواء الجوي. للمزيد من المعلومات عن الفواقد الأرضية راجع (Hull, et al., 1984).

يُمتص الإشعاع الشمسي في البركة عند أعماق وبأطوال موجات مختلفة، وذلك لأن معامل الحيود الضوئي $K\left(cm^{-1}\right)$ المذكور في الفصل الثالث يعتمد بقوة على الطول الموجي لطيف الإشعاع الشمسي. ويمكن تمثيل النفاذية في البركة الشمسية بطريقتين: كمجموع أربعة أسس تمثل أربع مركبات للطيف الشمسي (Rabl, Nielsen, 1975)، أو كدالة لوغارتمية (Bryant, Colbeck, 1977). تعتمد كلتا الطريقتين على تجارب سابقة، مراجعة لتلك التجارب إضافة إلى وصف لتجارب جديدة مدرجة في (Afeef, Mullett, 1989). وتُشير هذه التجارب إلى أن نفاذية المحلول الملحي الغير مرشح يكون أقل بكثير من قيمته في الماء، ولكن تزداد النفاذية بصورة كبيرة بعد عمليات الترشيح أو التصفية وتكون قريبة للماء للمحاليل المحتوية على 20% من كلوريدات الصوديوم والماغنيسيوم.

وقد حسب Kooi قيمة η/F_R بدلالة $\Delta T/I$ لبرك شمسية مختلفة الأعماق وقارنها بتلك للمجمعات الشمسية المستوية، والنتائج المتحصل عليها مبينة في الشكل (3.11). حيث تمثل المنحنيات (ب)، (جـ) البرك الشمسية ذات الطبقة العليا و الطبقة العديمة الحمل بسماكة 1، 2 m تحت السطح على التوالي. والفرق الحاصل يشير إلى الطاقة الإضافية الممتصة بواسطة الأمتار الإضافية للمحلول في المنطقة العلوية والمنطقة العديمة الحمل. ويعكس الميل الخفيف للمنحنى (جـ) الأمتار الإضافية من العازل (أي المحلول) فوق طبقة الحمل الدنيا. أما المنحنى (أ) فيمثل السلوك الحراري لمجمع شمسي مستوي إنتقائي السطح أحادي الغطاء.عند نقاط التشغيل المرتفعة ($\Delta T/I$)، إن أداء البرك الشمسية يظهر تحسن عنه عند المجمعات الشمسية.



شكل (3.11) منحنيات قيم η/F_R بدلالة $\Delta T/I$: (أ) مجمع شمسي مستوي انتقائي السطح أحادي الغطاء؛ (ب) بركة شمسية عمق سطح طبقة الحمل الدنيا 1 متر من سطح البركة؛ (ج) بركة شمسية عمق سطح طبقة الحمل الدنيا 2 متر من سطح البركة

3.1.11 تطبيقات البرك الشمسية

تم تشييد العشرات من البرك الشمسية حول العالم، والعديد منها صُممت لأغراض تجريبية. مع حلول عام 1989 أصبحت العديد من هذه البرك تنتج الطاقة برتابة لتغطية جزء من أحمال الطاقة. الجدول (1.11) يبين المواصفات الفنية للبرك الشمسية العاملة في منطقة حوض البحر الأبيض المتوسط (Safi, 2002).

4.1.11 وصف للبركة الشمسية الليبية

تقع البركة الشمسية التجريبية بمنطقة تاجوراء شرق مدينة طرابلس الغرب. تتألف البركة من المكونات الرئيسية التالية: البركة الرئيسية بمساحة سطحية تبلغ $830\,m^2$ وبعمق $2.5\,m$ ؛ البركة التبخيرية بمساحة $105\,m^2$ وعمق $1.5\,m$؛ حجرة

التحكم وملحقاتها (منظومة الضخ وسحب الحرارة، منظومة القياس والتحكم). كما تم تجهيز المشروع بمنظومة تحكم ومراقبة آلية معدة لقياس ومراقبة المتغيرات المختلفة التي تؤثر على عمل البركة الشمسية، كوسيلة عملية تجريبية للتحقق من أداء البركة وإجراء الدراسات البحثية بالخصوص تحت الظروف الجوية السائدة في الموقع (كما هو مبين في الشكل (4.11)).

جدول (1.11) المواصفات الفنية لبعض البرك الشمسية العاملة

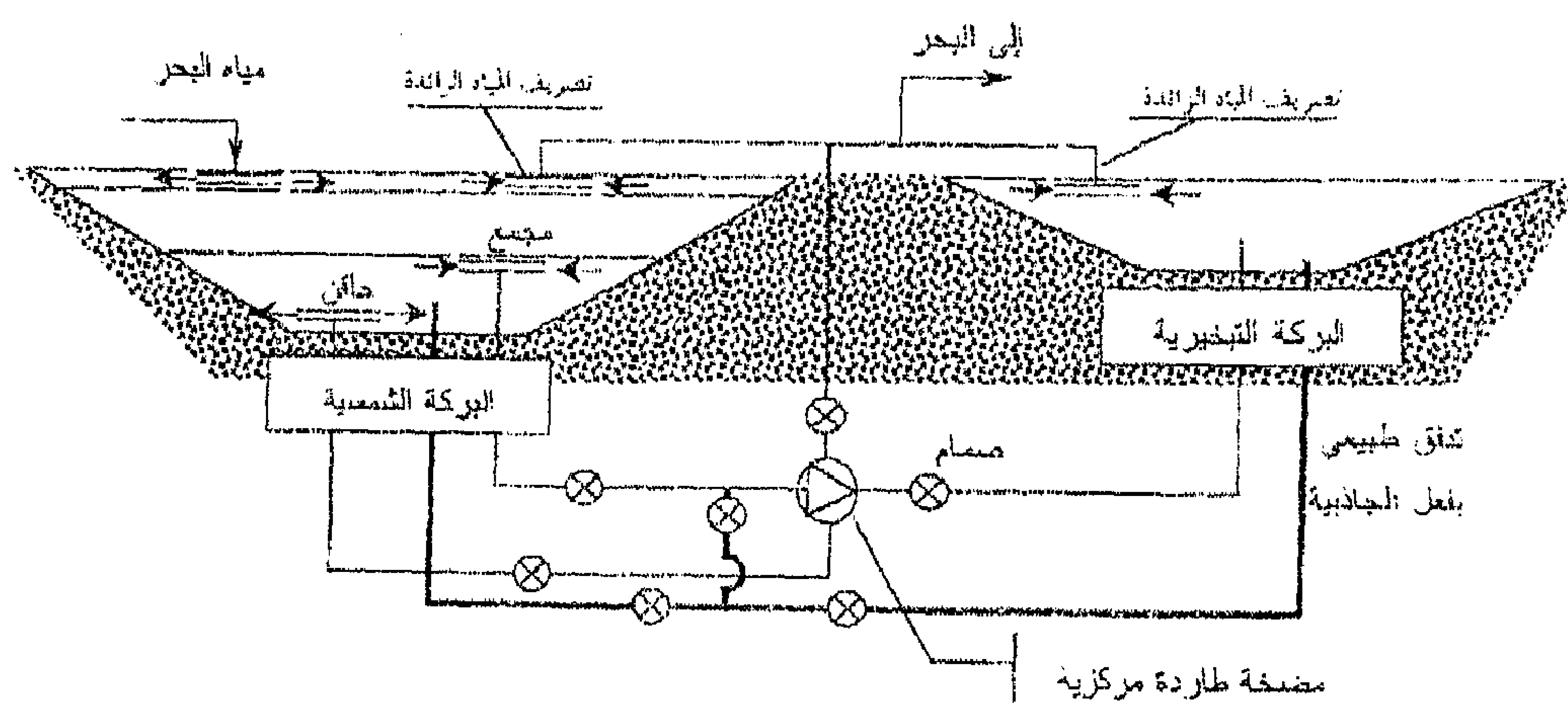
البلد	سنة التشييد	الأبعاد m^2	أقصى درجة حرارة في البركة $^\circ C$	الاستخدام
إيطاليا	82/1981	12	65	تجريبي
	1986	650	65	
	1988	25,000 $290\times87\times4\ m^3$	65	تحلية المياه
البرتغال	1981	1,024	60	
فرنسا	1976	1,000 $31,62\times31,62\times1\ m^3$	65	تجريبي
فلسطين	1984	250,000 40,000	90	إنتاج الطاقة الكهربائية $5\ MW_e$
		6,250	90	إنتاج الطاقة الكهربائية $150\ kW_e$
تونس	1991	120	67	تجريبي
	1997	1,500	97	تحلية المياه
ليبيا	2001	830	97	تحلية المياه $5\ m^3/day$

تم بناء مستوى تدرج تركيز الأملاح في الطبقات الثلاث على أساس أن تركيز الأملاح في طبقة الحمل العليا يصل إلى $42\ kg/m^3$ وبسمك $0.3\,m$، وتبلغ سماكة طبقة الحمل الدنيا $1.0\,m$ وبتركيز أملاح يصل إلى $256.94\ kg/m^3$، ويفصل هاتين الطبقتين الطبقة العديمة الحمل (المتدرجة التركيز) وهي طبقة بسمك $1.2\,m$ ويزيد تركيز الأملاح فيها مع العمق.

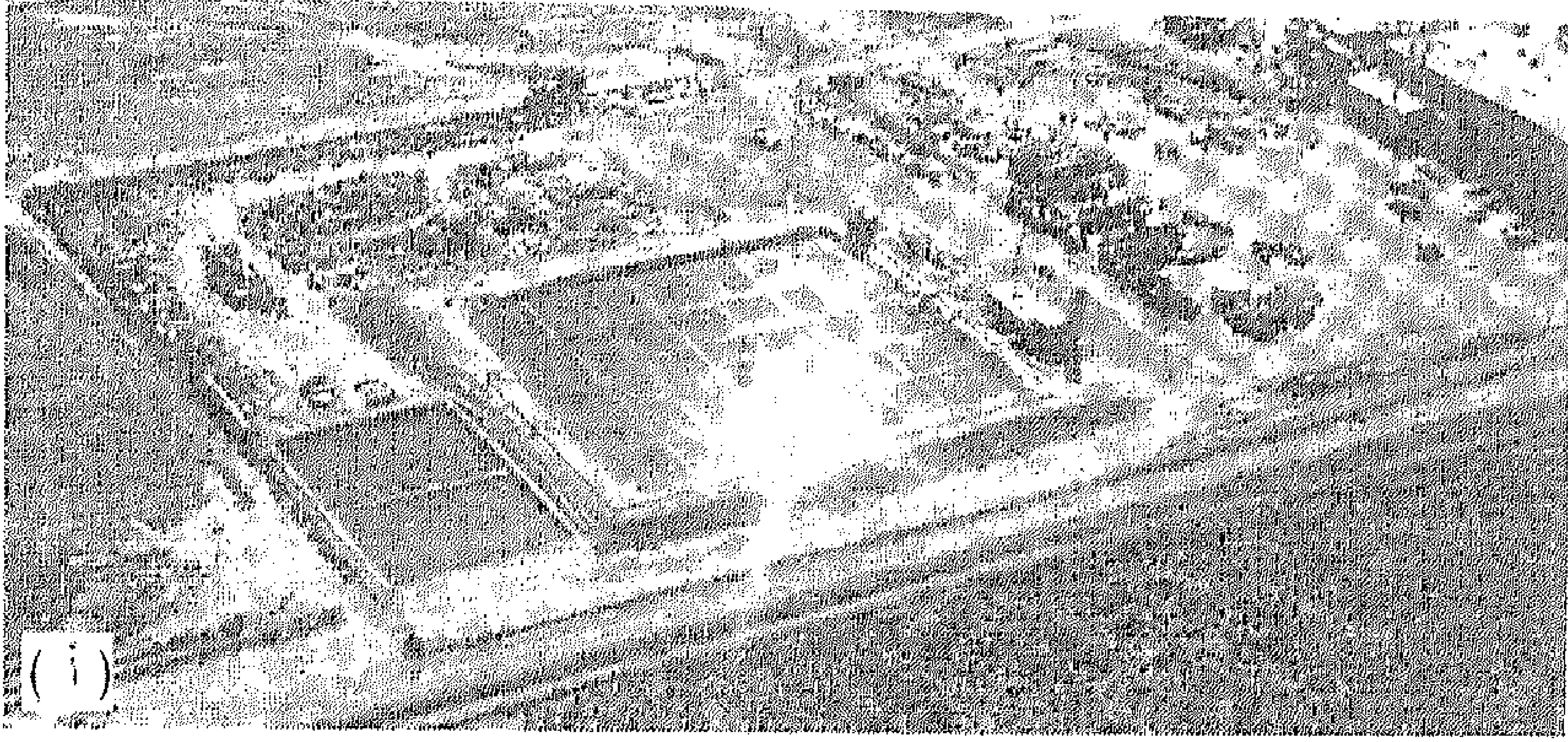
تستخدم البركة الشمسية هذه كمصدر للطاقة الحرارية لتغذية محطة تحلية مياه تعمل على مبدأ التبخير الوميضي، ويصل معدل الإنتاج اليومي للمحطة إلى $5\ m^3/day$, (أغا وأخرون، 1999).

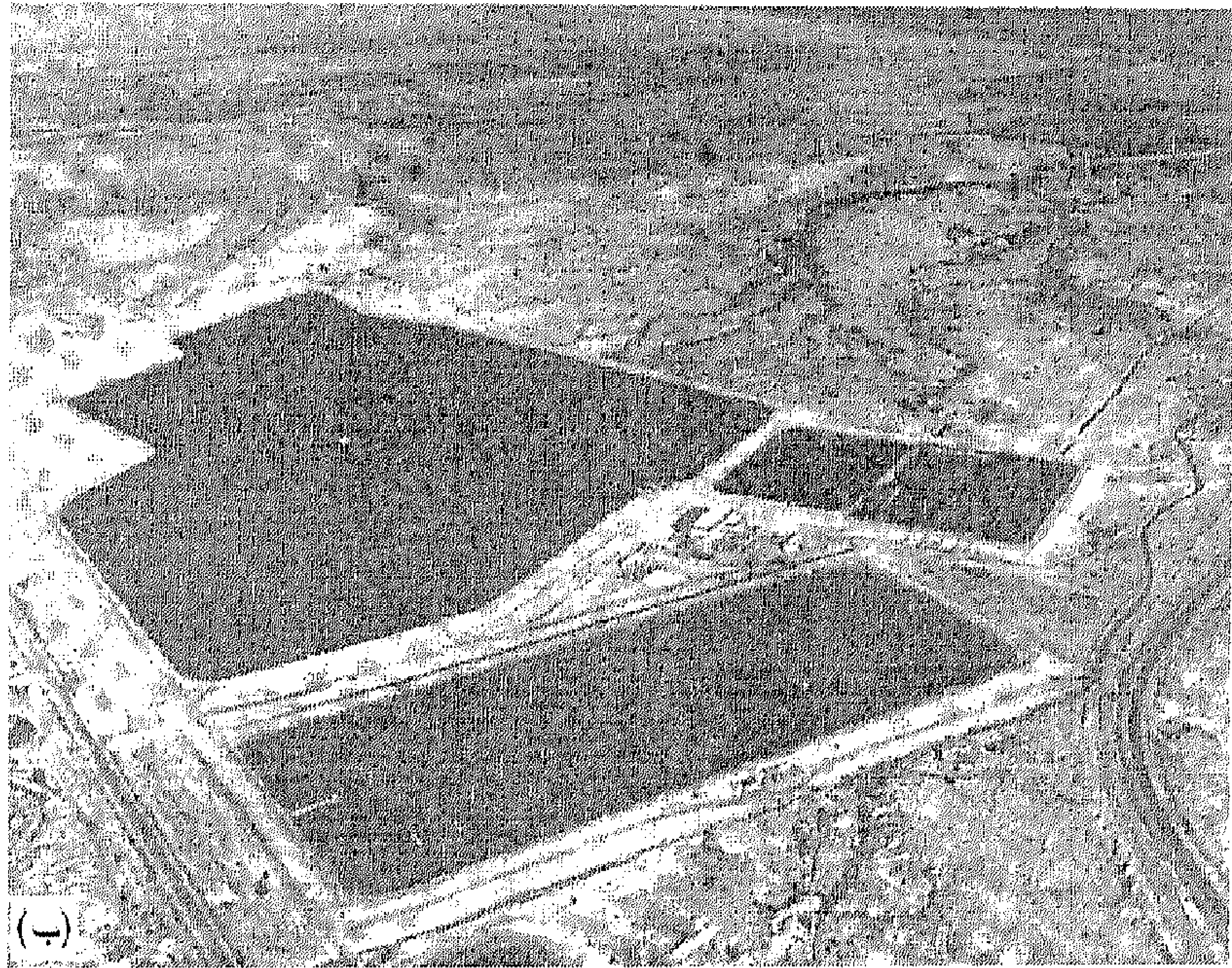
5.1.11 بعض البرك الشمسية في مناطق أخرى

تم تشييد العشرات من البرك الشمسية حول العالم، كما أشير إلى ذلك في الجدول (1.11). والصور المبينة في الشكل (5.11) لبرك شمسية عاملة في ElPaso بولاية تاكسس بالولايات المتحدة والآخرى على ضفة البحر الميت في فلسطين (Duffie, Beckman, 1991).



شكل (4.11) رسم تخطيطي للبركة الشمسية الليبية





شكل (5.11) صور لبعض البرك الشمسية العاملة في ولاية تكساس (أ) وفي فلسطين (ب)

2.11 الحفرة الشمسية

يمثل هذا المصطلح عمليات انتقال الحرارة في التربة تحت سطح الأرض. وسنتطرق في هذا الجزء إلى المتغيرات التي تُحدد درجة حرارة التربة تحت سطح الأرض. وتعتبر الخواص الحرارية للتربة من العوامل الرئيسية التي تؤثر في درجة

حرارة التربة، بالإضافة إلى المتغيرات الجوية والمتضمنة: شدة الإشعاع الشمسي، سرعة الرياح، الأمطار ودرجة حرارة الهواء الجوي.

1.2.11 درجة حرارة التربة تحت سطح الأرض

أمكن حساب درجة حرارة التربة على عمق 4 متر من سطح الأرض لمدينة طرابلس. واشتملت الدراسة (Nassar et al, 2006) على عدة حالات من التربة وهي: تربة ذات سطح جاف، تربة ذات سطح مغطى بلوح زجاجي وتربة بسطح مبلل بالماء. وبينت الدراسة المشار إليها أنه، وعلى عمق 4 متر وعلى مدار السنة كانت درجات الحرارة للحالات الثلاث 21، 46، 16 درجة مئوية على التوالي. كما حسب (Bansal, et al., 1983) درجة حرارة التربة تحت سطح الأرض وعلى عمق 4 متر على مدار السنة لمدينة نيودلهي – الهند، حيث بلغت أقصى درجة حرارة تقريباً $53°C$ لتربة جافة سوداء السطح مغطاة بلوح زجاجي وأقل درجة حرارة تقريباً $17.3°C$ لتربة مبللة وبسطح مظلل، وكان تذبذب درجات الحرارة على طول السنة بتردد $2\pi/12$.

بنيت نتائج الدراسات السابقة على أساس حل معادلة التوصيل الحراري أحادية البعد للحالة اللامستقرة والمتمثلة في الصورة التالية:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k(x)\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right) = \rho(x)Cp(x)\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \qquad (3.11)$$

حيث: يمثل المقدار $\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}$ معدل تغير درجة حرارة التربة $T(x,t)$ بالنسبة للعمق x؛ $\rho(x), Cp(x), k(x)$ تمثل الخواص الحرارية الموصلية الحرارية، الحرارة النوعية وكثافة التربة، على التوالي؛ والحد $\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}$ يمثل معدل تغير درجة حرارة التربة مع الزمن t.

2.2.11 الخواص الحرارية للتربة

تعتبر الموصلية الحرارية للتربة من أهم الخصائص الحرارية، بالإضافة إلى الكثافة والحرارية النوعية في حالة دراسة توزيع درجات الحرارة اللامستقرة للتربة. وتشتمل مكونات التربة على عدة عناصر منها: الرمل والهواء وأيضاً الماء. ويمكن إيجاد الخواص الحرارية لهذا التركيب بمعرفة النسبة الحجمية لكل عنصر في المركب، وتكون النتيجة كالتالي:

$$(\rho\ Cp) = f_s\ (\rho\ Cp)_s + f_w\ (\rho\ Cp)_w + f_a\ (\rho\ Cp)_a \qquad (4.11)$$

حيث يشير الرمز f إلى نسبة المشاركة الحجمية لكل عنصر في المركب، بينما تشير الرموز السفلية a, w, s إلى العناصر المكونة للتربة وهي على التوالي: الرمل، الماء والهواء. هذه النسب الحجمية تخضع للقانون:

$$f_s + f_w + f_a = 1 \qquad (5.11)$$

3.2.11 الموازنة الحرارية

اعتماداً على قانون بقاء الطاقة، يمكن صياغة معادلة الاتزان الحراري العامة وللحالة اللامستقرة لطبقة سطح التربة على الصورة التالية:

$$H_a - q''_s - q''_L - q''_v = (\rho\ Cp)\Delta x \frac{dT}{dt} \qquad (6.11)$$

حيث: H_a تمثل الطاقة الشمسية الممتصة في سطح التربة؛

q''_s تمثل معدل الفيض الحراري المنتقل بالتوصيل إلى الطبقة التالية من سطح التربة؛

q''_L تمثل معدل الفيض الحراري المفقود عن طريق الإشعاع والحمل من سطح التربة إلى الهواء الجوي؛

q''_v تمثل معدل الفيض الحراري المفقود عن طريق التبخير في حالة التربة المبللة، أما إذا كانت التربة جافة فإن $q''_v = 0$؛

أما الحد الأيمن فيشير إلى حد الاستقرار وفيه:

$(\rho\ Cp)$ يمثل المحتوى الحراري لمركب التربة، كما سبق الإشارة إليه في المعادلة (4.11)؛

Δx يمثل سمك طبقة التربة؛

$\frac{dT}{dt}$ يمثل معدل تغير درجة حرارة التربة بالنسبة للزمن.

وبالتالي يمكن التعبير عن كل حد في المعادلة (6.11) بقيمته، وذلك على الصورة التالية:

الحد الأول: $H_a = H_t\ \alpha_s$، لحالة التربة العارية وتساوي للتربة المغطاة بلوح زجاجي كالتالي:

$H_a = H_t\left(\tau_g\ \alpha_s\right)$، حيث يمثل الرمز H_t الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على السطح، ويدل الرمز α_s على امتصاصية سطح التربة، بينما يُشير الرمز τ_g إلى نفاذية لوح الزجاج، والتي تُحسب كما تم تبيانه في الفصل الثالث؛

الحد الثاني: $q''_s = -k\frac{dT}{dx}$، معادلة فورير للتوصيل الحراري؛

الحد الثالث: $q''_L = \left(h_{c,s-\infty} + h_{r,s-\infty}\right)\left(T_s - T_\infty\right)$، حيث يمثل $h_{c,s-\infty}$ معامل الفقد الحراري بالحمل من سطح التربة إلى الهواء ويُعطى بالعلاقة: $h_{c,s-\infty} = 5.7 + 3.8\,\overline{V}$، والرمز $\overline{V}$ يُشير إلى معدل سرعة الرياح. بينما يُعطى معامل الفقد الحراري بالإشعاع $h_{r,s-\infty}$ بالمعادلة التالية:

$h_{r,s-\infty} = \varepsilon_s \sigma \frac{\left(T_s^4 - T_{sky}^4\right)}{\left(T_s - T_\infty\right)}$؛ حيث: ε_s هي الانبعاثية الإشعاعية لسطح التربة،

σ - ثابت بولتزمان، T_s - درجة حرارة سطح التربة، T_{sky} - درجة حرارة السماء وتُعطى بالعلاقة التجريبية التالية: $T_{sky} = T_\infty - 6^\circ$، T_∞ - درجة حرارة الهواء الجوي.

الحد الرابع: $q''_v = \dfrac{h_{c,s-\infty}\ h_{fg}\,(C_s - C_\infty)}{(\rho\ Cp)_a}$، حيث: h_{fg} - الحرارة الكامنة للتبخير لبخار الماء المشبع عند درجة حرارة التربة T_s؛ C_s - تركيز الماء في التربة؛ C_∞ - تركيز الماء في الهواء الجوي؛ $(\rho\ Cp)_a$ - الحرارة النوعية والكثافة للهواء، على التوالي، عند درجة حرارة الهواء الجوي.

تركيز الماء في التربة والهواء الجوي تُعطى بالعلاقات التالية:

$$C_s = \frac{P_{sat}}{R_W\ T_s}\ ،\ C_\infty = \frac{P_v}{R_W\ T_\infty}$$

حيث: P_{sat} - ضغط التشبع عند درجة حرارة سطح التربة؛ P_v - الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء الجوي عند درجة حرارة الهواء الجوي: $P_v = P_g\ \Phi_\infty$، حيث: Φ_∞ - الرطوبة النسبية للهواء الجوي؛ P_g - ضغط التشبع للماء عند درجة حرارة الهواء الجوي؛ R_W - ثابت الغاز للماء.

بينما استخدم Nassar قيماً متغيرة للخواص الحرارية ذات علاقة خطية مع العمق، والتي تمثلت في المعادلات التالية:

$$\left.\begin{aligned} k(x) &= 0.2950\,x + 1.00 \\ \rho(x) &= 0.0910\,x + 2.17 \\ Cp(x) &= 0.0298\,x + 1.92 \end{aligned}\right\} \qquad 0 \le x \le 2$$

$$\left.\begin{aligned} k(x) &= 0.0364\,x + 1.520 \\ \rho(x) &= 0.0265\,x + 2.291 \\ Cp(x) &= 0.0298\,x + 1.920 \end{aligned}\right\} \qquad 2 < x \le 14 \qquad (4.11)$$

حيــث: يُرمــز للموصــلية الحراريــة $k(x)$، بوحــدات $W/m.K$؛ الكثافــة $\rho(x)$، بوحدات g/cm^3؛ والحرارة النوعية $Cp(x)$، بوحدات $kJ/kg.K$.

تبنت الدراسة الهندية قيماً ثابتة للخواص الحرارية للتربة وكانت القيم التالية:

الخاصية الحرارية	للتربة الجافة	للتربة الرطبة
الموصلية الحرارية k، $W/m.K$	0.51	1.456
الحرارة النوعية Cp، $kJ/kg.K$	1.8423	2.2352
الكثافة ρ، kg/m^3	2050	2460
معامل انتقال الحرارة بالحمل h_c، $W/m^2.K$	22.7	6.17

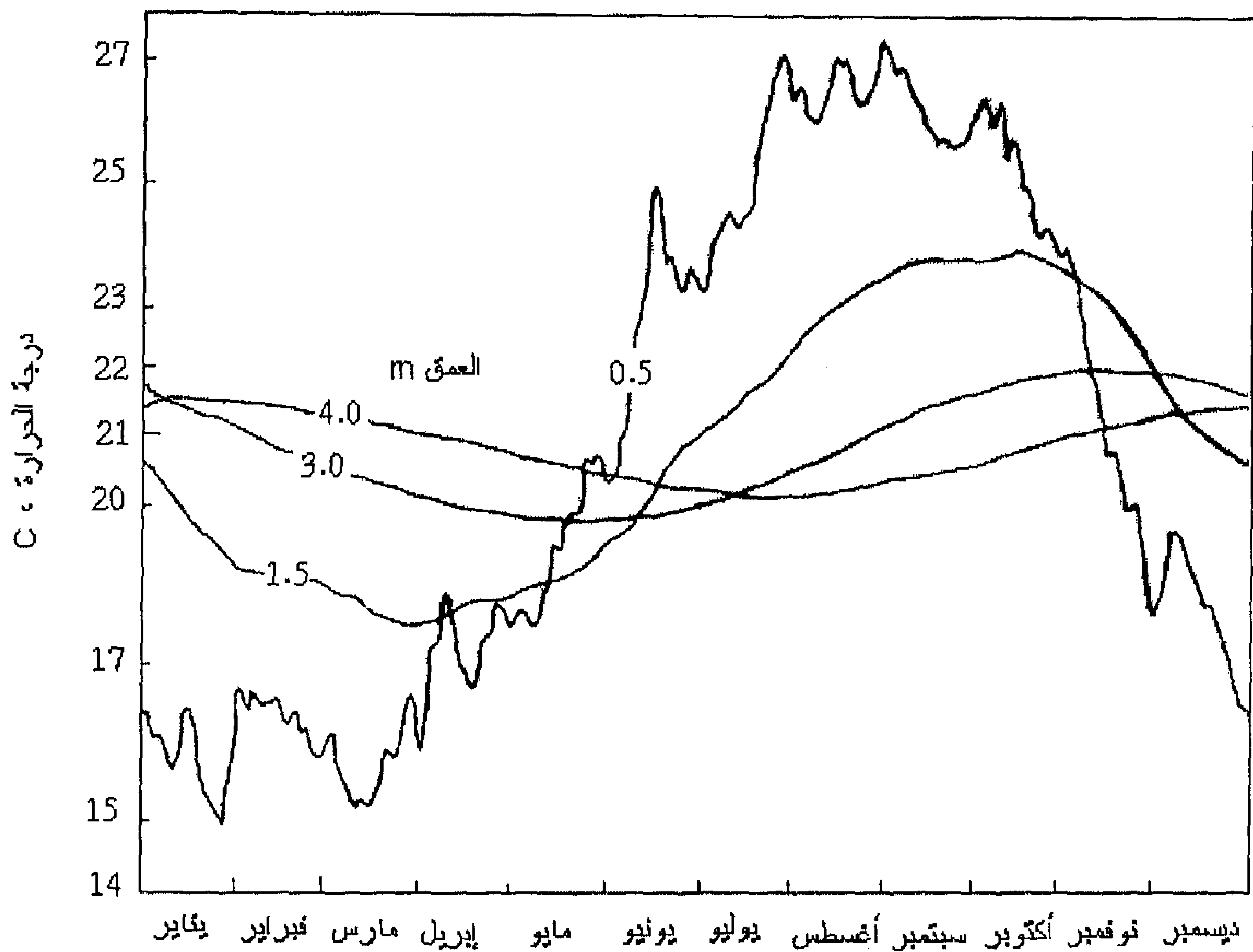
أما الخواص الإشعاعية والمتمثلة في الامتصاصية والانبعاثية لسـطح التربـة فكانـت كالتالي:

الخاصية الإشعاعية	للتربة	للتربة المغطاة بلوح الزجاج
الامتصاصية α	0.9	0.8
الانبعاثية ε	1.0	0.0

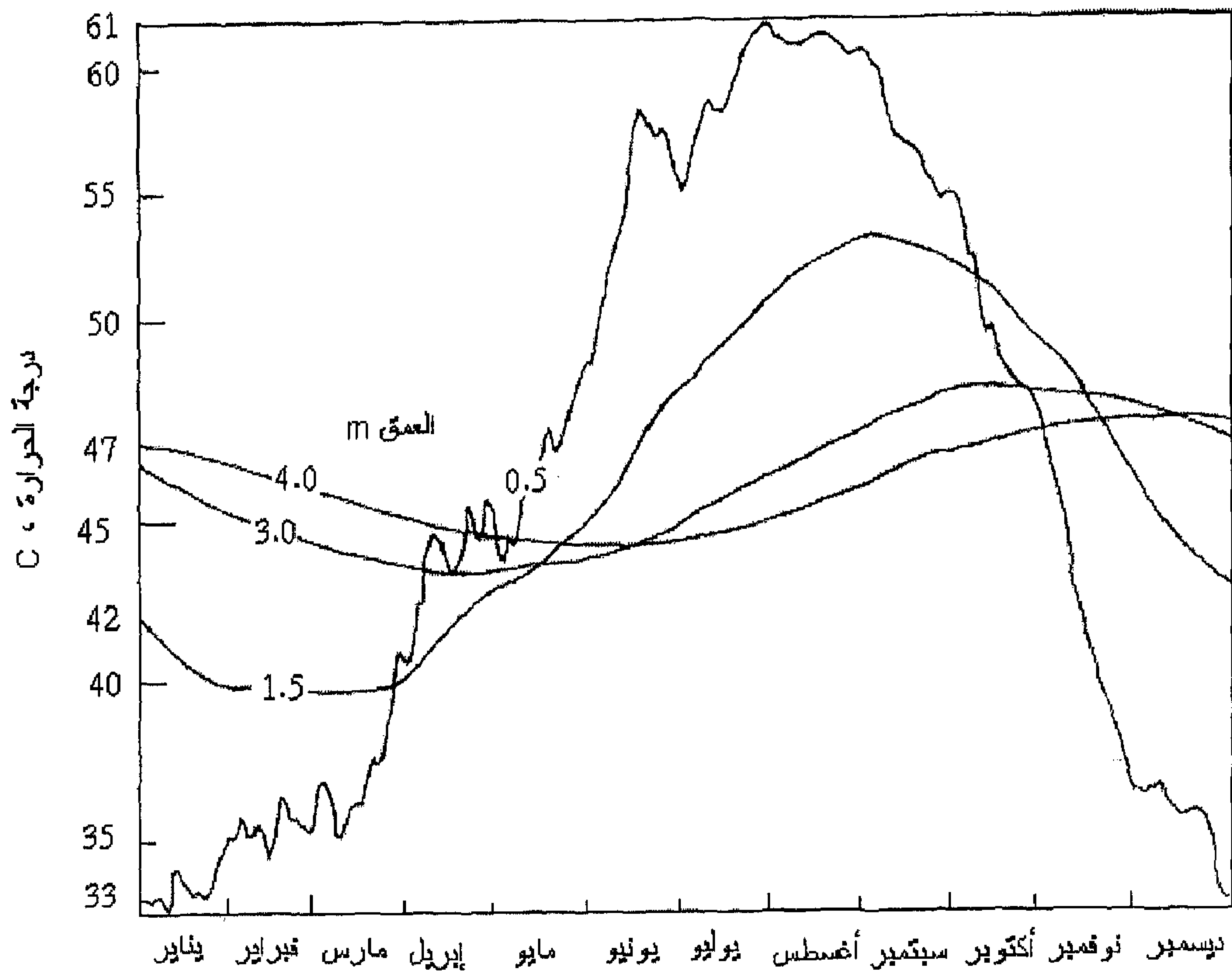
وبلغت أقصى درجة حرارة للتربة في مدينة طرابلس – ليبيا في شهري ديسمبر ويناير تقريباً $22°C$، وذلك على عمق $5\,m$، وأقل درجة حرارة كانـت في شـهري يوليو وأغسطس، حيث بلغت تقريباً $21.2°C$ على عمق $3\,m$، وذلك على أساس تبني قيم ثابتة للخواص الحرارية لتربة الموقع المدروس.

مثلـت نتـائج دراسـة (Nassar et al, 2005) بالأشـكال (6.11)، (7.11)، حيـث تمثل الأشكال توزيع درجات حرارة التربة لمدينة طرابلس – ليبيا على أعمـاق مختلفـة، وذلك لسطح تربة جافة عارية والأخرى مغطاة بلوح زجاجي، على التوالي.

تكمن صعوبة حل المعادلة (6.11) أو إجراء محاكاة عددية، في إيجاد درجات حرارة طبقات التربة الابتدائية. والسبيل للحصول على هذه الدرجات إما تجريبياً (أي عن طريقة معرفة درجات طبقات الأرض عند لحظة بدء المحاكاة)، أو عن طريق (تقنية التجربة والخطأ)، وتتمثل هذه التقنية في فرض درجات الحرارة الابتدائية لكافة الطبقات، ومن ثم الحصول على درجات حرارة الطبقات في نهاية مدة المحاكاة والتي غالباً ما تكون سنة كاملة، وبالتالي فإن درجات الحرارة للطبقات في نهاية مدة المحاكاة يجب أن تكون مساوية لتلك المفروضة مسبقاً، وإلا يجب إعادة المحاولة مرة أخرى وبقيم أخرى حتى الوصول إلى ما يُسمى بمرحلة استقرار الحل.



شكل (6.11) توزيع درجات حرارة الأرض عند أعماق مختلفة على مدار السنة، لتربة جافة في مدينة طرابلس



شكل (7.11) توزيع درجات حرارة الأرض عند أعماق مختلفة على مدار السنة، لتربة جافة مغطاة بلوح زجاجي في مدينة طرابلس

المراجع

1. خيري أغا ، محمد سبيطة، هاني فتيتة، *كتاب أبحاث الندوة العلمية حول الطاقة الشمسية*، مايو 25-26، (1999)، براك الشاطئ- ليبيا، 169. "صيانة وتشغيل بركة شمسية تجريبية."

2. Afeef, M. and Mullett, L. B., *Solar & Wind Technology*, **6**, 1 (1989)."Solar Transmissin in salt solutions with reference to solar ponds".

3. Bansal, N.K., Sodha, M.S., Bharadwaj, S.S., *Energy Research*, **7**, (1983), New Delhi-India. "Performance of Earth Air Tunnels."

4. Batty, J.., Riley, J.P. and Panahi, Z., *Solar Energy*, **39**,483 (1987)."A water requirements Model for Salt-Gradient solar ponds".

5. Bryant, H.C., Colbeck, I., *Solar Energy*, **19**, 321 (1977). "A Solar Pond for London."

6. Duffie, J. A., Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Process*, John Wiley & Suns inc., 2nd edition, (1991).

7. Hull, J.R., Lui, K.V., Sha, W.T., Nielsen, C.E., *Solar Energy*, **33**, 25 (1984). "Dependence of Ground Heat Loss upon Solar Pond Size and Perimeter Insulation: Calculated and Experimental Results."

8. Hull, J.R., Nielsen, C.E., Golding, P., *Salinity Gradient Solar Ponds*, CRC Press, Boca Raton, FL (1989).

9. Hull, J.R., Scrantin, A.B., Mehta, J.M., Cho, S.H., Kasza, K.E., report ANL 86-17, Argonne National Laboratory, Argonne, IL. (1986). "Heat Extraction from the ANL Research Salt-Gradient Solar Pond."

10. Jaefarzadeh, M. R., Akbarzadeh, A., *Solar Energy*, **5**, 375 (2002). "Towards the Design of Low Maintenance Salinity Gradient Solar Ponds."

11. Kooi, C.F., *Solar Energy*, **23**, 37 (1979). "The Steady State Salt-Gradient Solar Pond."

12. Nassar, Y.F., Noaman, A., Abutaima, A., Yousif, S., Salem, A., Renewable energy, 31, 593 (2006) "Evaluation of the Underground Soil Thermal Storage Properties in Libya".

13. Nielsen, C.E., paper in *Advances in Solar Energy*, (K. Boer, ed.) **4**, 445 (1988), American Solar Energy Society and Plenum Press. "Salinity-Gradient Solar Ponds."

14. Nielsen, C.E., *Proceedings of the 1978 Annual Meeting of the American Section of the ISES*, **2** (1), 932 (1978). "Equilibrium of the Stable Gradient Zone in Solar Ponds."

15. Punyasena, M.A., Amarasekara, C.D., Jayakody, J.R.P., Perera, P.A.A., Ehamparam, P., *Solar Energy*, **75**, 447 (2003). "An Investigation of Rain and Wind Effects on Thermal Stability of Large-Area Saltpan Solar Ponds."

16. Rabl, A., Nielsen, C.E., *Solar Energy*, **17**, 1 (1975). "Solar Ponds for Space Heating."

17. Safi, M.J., *Proceedings of Forum International Sur Les Energies Renouvelables*, May 08-10, Tetouan-Maroc, 448 (2002). "Utilisation des Etanges Solaires Pour la Captation et le Stockage Saisonnier."

18. Tabor, H., *Proceedings of the UN Conference on New Sources of Energy*, **4**, 59 (1964). "Large Area Solar Collectors (Solar Ponds) for Power Production."

19. Tabor, H., Weinberger, *in Solar Energy Handbook* (J. Kreider and F. Kreith, eds), McGraw-Hill, New York (1981). "Nonconvecting Solar Ponds."

20. Weinberger, H., *Solar Energy*, **8**, 45 (1964). "The Physics of the Solar Pond."

الخاتمة

أدركت منذ البدء في تأليف هذا الكتاب أنه ليس بالعمل اليسير، وتكمن صعوبته في عمومية الموضوع، فالطاقة الشمسية مجال رحب يصعب أن يُجمع بين ضفتي كتاب واحد. ولقد اخترت التطبيقات التي تلائم الوطن العربي، ولاسيما أنه موجه إلى طلاب الجامعات والمعاهد العربية المتخصصة، بالإضافة إلى التوجهات الدولية الحديثة للتطبيقات الشمسية، معتمداً في ذلك على مراجع علمية متخصصة حديثة.

هذا وقد نُوقشت في هذا الكتاب مواضيع جديدة ولأول مرة في ساحة تأليف الكتاب المنهجي، وأخص بالذكر منها المواضيع التالية:

1. تم إجراء مقارنة تقنية ـ إقتصادية ـ بيئية بين تقنيات إنتاج الطاقة الكهربائية المختلفة التقليدية منها والبديلة.
2. تم إجراء تحليل عددي موضعي لدرجات حرارة عناصر المجمع الشمسي.
3. تم إدراج التأثير البيئي لإنتاج الطاقة الكهربائية من محطات إنتاج الطاقة الكهربائية التقليدية والبديلة في الحسابات الإقتصادية لسعر الطاقة الكهربائية المنتجة.
4. تم إجراء مقارنة اقتصادية بين تقنيات إنتاج الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية، وذلك من خلال دراسة تحليلية لكافة المنظومات الشمسية لإنتاج الطاقة الكهربائية.
5. تم مناقشة موضوع التصميم المثالي للمنظومات الشمسية الحرارية، من خلال تعيين مساحة المجمعات الشمسية المثالية لتغطية جزء معين من حمل التدفئة

وتسخين المياه، تحديد معدل تدفق المائع المثالي خلال المنظومة، اختيار النوع المناسب من المبادلات الحرارية، حساب حجم العازل المثالي لعزل أنابيب التوصيل في المنظومة، تعيين الحجم المثالي للخزان الحراري.

6. تم إدراج التحليل الحراري للحفرة الشمسية، والتي من الممكن أن تُغطي نسبة لا يستهان بها من حمل التدفئة والتبريد في المباني.
7. تم سرد المواصفات التقنية والأبعاد القياسية لبعض محطات الطاقة الشمسية العاملة في العالم.

وأخيراً، آمل أن أكون قد وفقت في عرض بعضاً مما كان يجب أن يُعرض، فإن أصبت فمن الله وإن أخطئت فمن نفسي.

والله من وراء القصد...

د. ياسر فتحي نصّار



جامعة سبها